

金属-セラミックス複合粉末を用いた アルミニウム表面のレーザアロイングに関する基礎研究

学位論文内容の要旨

アルミニウム (Al) は、単位重量あたりの強度が高く、さらに耐食性、加工性などに優れた工業材料であるが、軟質な金属であるため、これを機械部品に利用する場合、表面硬化処理が必要となる。現在、代表的なAlの表面硬化処理技術として、陽極酸化法とめっき法が多用されている。しかしながら、これらの方法によって形成できる硬化層の厚さは、実用では数十 μm が限界である。高負荷がかかる機械部品の場合、表面硬化層の厚さが数十 μm 程度であると、Al基材が塑性変形して硬化層の剥離を生じるため、数百 μm 以上の厚い表面硬化層が必要である。

レーザ光照射によるAlの表面合金化法（レーザアロイング）は、数百 μm 以上の厚い硬化層を必要な部分に、短時間に、しかも大気中で形成できることを特長とする新しい表面改質技術であり、実用化が期待されている。このレーザアロイングプロセスでは、照射したレーザエネルギーにより添加材料と基材表面を同時に熔融し、基材表面に新たな組成と構造を持った合金化層を形成する。レーザアロイングに関する研究は、これまで添加材料（合金化材料）として各種の金属、セラミックスあるいはガスが用いられ、それぞれのAlとの反応性や形成された合金化層の形態について実験的検討がなされてきた。しかし、実用化に向けては、合金化層を厚くすること、合金化層の厚さ、組成・組織を均一にすること、さらにクラック、ポロシティなどの欠陥発生を抑制することなどが課題として挙げられている。

厚さ、組成・組織の均一な合金化層を形成するためには、レーザ照射条件の検討はもちろん重要であるが、合金化材料とAl基材表面で起こる、レーザ光の吸収、熔融、合金化反応、凝固といった主に4ステップからなるレーザアロイングプロセスを考慮した合金化材料の選択やその組成、構造の設計が必要かつ重要である。そこで、著者は、基礎実験における合金化層形成の初期状態の観察結果から、合金化材料はレーザ光に対して吸収率が高く、かつAl基材との反応性に優れていることが重要であると考え、そのような特性を持つ金属-セラミックス複合粉末を新しく開発し、これを用いてアルミニウムのレーザアロイングに関する基礎的研究を行った。

本研究では、まず CO_2 レーザ光に対して吸収率が高く、かつAlとの合金化が可能であり、さらに低価格で工業的に広く利用されているセラミックス粉末として TiO_2 を選定した。これまでの研究では、 TiO_2 を合金化材料として用いても合金化層は形成されず、肉盛り層だけが形成されるとされていた。しかし、高圧鋳造法では TiO_2 とAlは反応してAl-Ti系金属間化合物を生成することが報告されている。このことから、レーザアロイングにおいてもレーザ照射条件によって合金化層が形成される可能性があるかと推察した。 TiO_2 粉末を用いたレーザアロイング実験を行った結果、熔融層の形態がレーザ出力の増加とともに肉盛り層から合金化層

に変化すること、そして形成された合金化層の組織は、 TiB_2 や SiC を用いたときに形成される粒子分散型の合金化層とは異なり、 Al と Al_3Ti の共晶となることが明らかとなった。すなわち、 TiO_2 粉末は新たなレーザアロイング用合金化材料として利用可能であることが実証された。

しかし、 TiO_2 - Al 間の反応によって形成される合金化層の厚さや組織は不均一であり、その原因は TiO_2 - Al 間の低反応性によると推測される。そこで、本研究ではその対策として、 Al に対して高い反応特性を持つ Ni の添加効果の検討を行った。 Ni の添加方法については、乾式法であるメカノケミカル法も検討したが、生産性など工業的な観点から TiO_2 粉末表面に Ni を無電解めっきする方法を採用した。まず、適正な Ni の添加量を実験的に求めるため、 Ni めっき量を変えた数種類の複合粉末を作製した。これら粉末を用いてレーザアロイング実験を行った結果、形成される合金化層は、 TiO_2 粉末あるいは Ni 粉末を単独で用いたときに比べ、表面が平滑で、均一な組織となること、また TiO_2 と Ni の重量比が1:1のとき、最も良好な合金化層が得られることを示した。さらに、この粉末を用いてレーザ照射条件と合金化層の組織との関係について調べた結果、合金化層の組織と硬さは、粉末塗布層厚さ、レーザ出力、レーザ走査速度を選択することによって制御可能であること、また合金化層内でのポロシティとクラック発生は、それぞれ粉末塗布層厚さの選択と Al 基材の予熱によって、抑制可能であることが明らかとなった。本研究では、レーザ出力2.4kWで、デフォーカス法によって、ポロシティおよびクラックがなく、しかも均一な組織で、最大厚さ0.7mm、最大マイクロビッカース硬さ(Hv) 500の合金化層を形成することができた。

次に、合金化層を実際に利用する際に最も重要な機械的性質である摩耗特性を評価した。合金化層に対してすべり摩擦実験を行い、 Al 基材および調質した炭素鋼と比較した。その結果、 Al がマトリックスとなり、 Al_3Ni と Al_3Ti が晶出することによって硬化し、マイクロビッカース硬さ(Hv)が200以上となった合金化層は、全ての摩擦条件下で Al 基材(Hv30)より優れた耐摩耗性を示した。さらに、高速、高荷重のすべり摩擦条件下では、相手材との摩擦面に耐熱性のある固体潤滑膜を形成するため、炭素鋼(Hv400)より摩耗量が少なくなり、従って合金化層は耐凝着摩耗性、耐焼付き性に優れていることが明らかとなった。

最後に、 TiO_2 粉末に Ni を添加した複合粉末を用いることによって合金化層の組織が均一となるメカニズムを明らかにするため、合金化層の形成過渡期における断面の組成分析、さらに合金化粉末の焼結と熱分析による合金化反応のモデル実験を行った。その結果、熔融

Ni は熔融した Al と接触すると急激な発熱反応によって、 Al - Ni 系金属間化合物を生成することが明らかとなった。 Al_3Ni が生成される反応熱は約40 kJ/molであり、これは Al の熔融池温度を100K以上上昇させるのに十分な熱量である。このことから、 Ni - Al 間の反応熱が TiO_2 - Al 間の反応を加速したり、熔融池の凝固速度を遅らせることで、熔融池内での合金化元素の拡散を促進し、その結果合金化層の組織が均一化され、合金化層厚さのうねりが軽減されるものと考えられる。

本研究によって、レーザアロイングにおいて均一な合金化層を形成するためには、レーザ光の吸収率が高く、かつ基材との反応性に優れた、金属とセラミックスを組み合わせた複合粉末の利用が非常に有効であることが明らかとなった。これらの結果は、今後レーザアロイングの実用化に向けての指針となると考えられる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 池 田 正 幸

副 査 教 授 岡 田 亜紀良

副 査 教 授 武 笠 幸 一

副 査 教 授 成 田 敏 夫

学 位 論 文 題 名

金属－セラミックス複合粉末を用いた

アルミニウム表面のレーザアロイングに関する基礎研究

アルミニウムはその金属としての優れた特性から広く利用されている。最近では資源リサイクルの観点から機械部品として積極的に使用されてきている。しかしながら、アルミニウムを機械部品に適用する場合、その硬さの低い事が問題とされる。これを解決するために、各種の表面硬化処理法が開発され、実用化されている。高出力CO₂レーザを用いたアロイングは最も実用化が期待されている表面改質技術である。

本論文は厚さ、組成、組織の均一で欠陥が少なく、かつ、基材表面と高い結合力の硬い合金層を形成するために、レーザ光の吸収による温度上昇、溶融、合金化反応、凝固のレーザアロイング基礎過程を重視した合金化添加材料の選択、組成・構造設計を行ない、現在までに報告されているデータとしては世界で最も高レベルの合金化層を形成するレーザアロイング技術の開発に関する基礎的成果をまとめたものである。

すなわち、添加材料としてAlと合金化が可能であり、CO₂レーザ光の吸収率が高く低価格で工業的に広く利用されている金属酸化物セラミックスのTiO₂とAlに対して高い反応性を示すNiを選択し、その複合粉末を開発してNi添加量50%で最も良好な合金化層を形成できることを明らかにした。その結果、世界で初めて照射レーザ出力2.4kWでも、厚さ0.7mmでポロシティやクラックのない均一な組織の合金層を形成することができた。合金化層はAlがマトリックスとなってAl₃Ni、Al₃Ti等金属間化合物が晶出した組織で、マイクロビッカース硬さ500を得た。また、金属間化合物生成時の発熱反応が合金化層の均質化に寄与していることを明らかにした。摩耗試験によれば合金化層は高負荷条件下では焼入れした炭素鋼より耐摩耗性が高い結果を得た。このように、

レーザ光の吸収特性と基材との反応性から金属、セラミックスの組合わせを選択することがレーザアロイングの実用化の指針となることを明らかにした。

これを要するに、著者はレーザアロイングにおいてレーザ光の吸収特性と基材—添加金属の反応性が最も重要であることを実験的、理論的に明らかにしたものであり、材料工学、機械材料、レーザ加工学の進展に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。