

称号及び氏名 博士（工学） 山口 拓人

学位授与の日付 平成 27 年 3 月 31 日

論文名 「レーザ合金化プロセスによる材料表面高機能化に関する研究」

論文審査委員 主査 中平 敦
副査 岩瀬 彰宏
副査 東 健司

論文要旨

近年、産業機械の高速化等にもなるとともに、機械部品や金型などに対して、極めて高い耐久性や耐摩耗性が求められている。摩耗は相手材と擦れ合う回数の多い箇所や負荷の大きな箇所で発生するため、損傷する箇所は局所的である場合が多い。そのため、摩耗しやすい箇所に対して局所的に高い耐摩耗性を付与することで、最小限のコストで製品全体を長寿命化することが可能となる。

レーザを用いた表面改質は、レーザを照射した領域のみに対して局所的に処理を行うことで、必要な箇所のみに必要な機能を付与することが可能である。レーザ表面改質の一つであるレーザ合金化は、レーザ照射によって熔融させた基材表面に他の元素を添加し、基材とは異なる組成の合金層を形成させることで表面を高機能化する手法である。

レーザ合金化は、添加元素として利用できる材料の自由度が高く、基材や添加する材料の選択によりレーザ照射部に硬質なセラミックス粒子を生成することによって耐摩耗性の向上を図ることが可能である。しかし、レーザ合金化は急速な熔融・凝固現象を伴うものであり、欠陥のない均一な合金層を得るためのプロセスや合金層の組織を制御する技術は未だ確立されていない。

本研究では、金属表面の耐摩耗性向上を目的としてレーザ合金化プロセスによる表面硬化および硬質炭化物粒子と基材金属との複合化を試み、レーザ照射部に形成される合金層の組織学的特徴と処理条件の関係を詳細に調査した。さらに合金層中に生成する炭化物の形態や組成の評価結果と計算状態図から予測される組織との比較を行い、レーザ合金化プロセスによる材料設計の可能性について検証を行った。

第1章では、本研究の背景として、レーザ加工の概要について述べるとともに、機械部品、金型、工具など各種金属部材に要求される性能の一つとして耐摩耗性を取り上げ、耐摩耗性を向上させるための従来手法についてまとめた。その中で耐摩耗材料として有用である、硬質セラミックス粒子と複合化した金属基複合材料に着目し、レーザ合金化プロセスによる金属基複合材料の表面層形成に関する先行研究事例および課題についてまとめた。

第2章では、低炭素鋼を対象として、グラファイト粉末を使用したレーザ合金化プロセスにより、表面の高硬度化を実現する手法について検討した。グラファイト供給量およびレーザ照射条件を適切に制御することで、均一なラスマルテンサイト組織からなる、約 800HV の硬化層が形成

されることを見出した。また、母材の酸素含有量が気孔の生成に影響をおよぼすことを明らかにし、無欠陥の合金層を得るためには母材の選択が重要であることを指摘した。さらに、レーザ合金化とレーザ焼入れの複合処理により硬化層の幅を制御する手法を検討した。レーザ合金化処理を一定間隔で複数回行うと、隣接パスを処理する際の熱影響による軟化が発生するが、レーザ合金化後にレーザ焼入れ処理を施すことにより軟化領域の硬度が増加し、均一な硬さの硬化層が得られることを見出した。

第3章では、第2章と同様のプロセスを炭化物の生成傾向の強いチタン基材へと適用し、グラファイトとチタンの反応により炭化チタンを生成させることでTi/TiC複合層の形成を試みた。チタン基材の場合には、鋼基材の場合と同様の処理条件であっても、表面の荒れや陥没が発生し、正常な合金層が得られないことが分かった。この原因を明らかにするためレーザ照射部を直接観察した結果、グラファイトとチタンの発熱反応に起因する不安定な溶融池挙動が表面荒れを引き起こすことが分かった。表面荒れを抑制する手法として、粒径の大きなグラファイト粉末の使用および樹脂バインダーによる粉末の固着が有効であることを明らかにした。しかしグラファイトの粒径が大きいほど合金層の表面荒れは抑制されるが、合金層内に未溶解の状態グラファイトが残存する傾向が見られた。未溶解グラファイトの残存とレーザ入熱量との関係を調査し、適切なグラファイト粒径およびレーザ照射条件において、未溶解グラファイトの残存のない均一な合金層が得られることを明らかにした。TiCの形態は主にデンドライト状であり一部には微細な共晶TiCの存在が認められた。X線回折および元素分析の結果から、このプロセスで生成するTiCはC/Tiが0.5程度であり、Ti-C二元系状態図において2000°C~2500°C付近で液相と平衡する値とほぼ一致する。本プロセスで得たTi/TiC複合層は、鋼を相手材とした場合には良好な耐摩耗性を示すがアルミナ相手材に対しては耐摩耗性の向上が見られず、相手材の硬さによって摩耗特性が異なることが分かった。

第4章では、グラファイトとチタンの混合粉を添加材料として使用し、炭素鋼基材に対してレーザ合金化処理を行うことで、鉄素地にTiCが分散したFe/TiC表面複合層の形成を試みた。本章ではまずグラファイトとチタンの混合比について検討を行い、重量比C:Ti=1:4(原子比でC:Ti=1:1)の配合で混合した場合に、合金層は最も高い硬さを示すことが分かった。この配合比で作製した混合粉を使用してレーザ合金化実験を行い、粉末の供給量やレーザ照射パラメータによって得られる合金層組織の違いについて詳細に調べた。粉末の供給量の増加およびレーザ送り速度の増加により、合金層の含有チタン量およびTiCの体積率が増加することが分かった。またTiCには花弁状やデンドライト状の初晶TiCと微細な共晶TiCがあり、TiC体積率の増加とともに初晶TiCのサイズが粗大になるが共晶TiCのサイズはほとんど変化しないことが分かった。TiCの体積率の増加にともなって合金層の硬さはわずかに上昇するが、体積率が低い場合には合金層の硬さは基材の焼入れ硬さとほぼ同等であった。しかし基材の焼入れ硬さとほぼ同等の硬さであっても、TiCが分散した合金層は、基材の焼入れ部より約2倍耐摩耗性が向上することが分かった。またFe中に分散しているTiCの組成比C/Tiは1に近いものであり、第3章で作製したTi中に生成するTiCとは異なる結果となることが分かった。本プロセスで得られる組織について、初晶TiCの生成する組成範囲およびTiCの体積率は、Thermo-Calcで計算した結果と良い一致を示すことを見出した。

第5章では、チタン、ニオブ、バナジウムの各粉末をそれぞれグラファイト粉末と混合した粉末を使用し、炭素鋼基材上でレーザ合金化処理を行った。これらの金属粉末はいずれも炭化物生成能が強く、硬質なMC炭化物を形成しやすいという特徴を有している。これらの添加材料の違いによって、形成される炭化物やその分散状態、マトリクス状態の比較を行った。Ti合金層およびNb合金層では、いずれも初晶MCと共晶MCが基材の焼入れ組織であるラスマルテンサイト中に分散した組織となり、Ti合金層およびNb合金層は類似した組織が得られることが明らかとなった。一方、V合金層は初晶MCの存在が確認できず、デンドライト状の初晶オーステナイトとデンドライト間に共晶MC炭化物の存在する組織となることが分かった。また、Ti合金層およびNb合金層のマトリクス中にはTi、Nbとも含有量は極めて小さかったが、V合金層における

オーステナイトマトリクスには過飽和に V を含んでいることが STEM-EDS 分析の結果から明らかとなった。これらの炭化物分散状態やマトリクス組織の違いは Thermo-calc による計算状態図の結果とよい一致を示す。レーザ合金化プロセスにおける合金層の凝固組織を、計算状態図の結果から予測が可能であることを示した。摩耗試験の結果から、いずれの合金層においても耐摩耗性の向上が認められた。

第 6 章では得られた成果を総括した。本研究で得られた知見は、レーザ合金化における組織制御の方向性を明らかにしたものであり、高付加価値製品を生み出すレーザ合金化プロセスの実用化に大きく貢献するものである。

審査結果の要旨

近年、産業機械の高速化等に伴って、機械部品や金型などに対して高い耐久性や耐摩耗性が求められている。摩耗は相手材と擦れ合う回数の多い箇所や大負荷の箇所で局所的な損傷が生じる場合が多い。そのため摩耗箇所に対し局所的に高耐摩耗性を付与することで最小限のコストで製品全体を長寿命化することが可能となる。本研究では金属表面の耐摩耗性向上を目的としてレーザ合金化プロセスによる表面硬化と硬質炭化物粒子と基材金属との複合化を試み、レーザ照射部に形成される合金層の組織学的特徴と処理条件の関係を明らかにしたものであり、以下の成果を得ている。

- (1) 低炭素鋼に対して、グラファイト粉末を使用したレーザ合金化処理を行い、レーザ照射パラメータにより合金層のマイクロ組織を制御することで、均一なラスマルテンサイト組織からなる表面高硬度化を見出した。さらに硬化層は中～高炭素鋼の焼入れ材と同程度の耐摩耗性を有することが分かった。
- (2) Ti 基材に対してレーザ合金化処理を行い、Ti/TiC 表面複合層の形成を試み、グラファイト粒径の最適化と樹脂バインダーによる粉末の固着により、デンドライト状の TiC と微細共晶 TiC が Ti 中に分散した Ti/TiC 複合層となり、鋼相手材に対し優れた耐摩耗性を示すことを見出した。
- (3) グラファイトと Ti の混合粉を用い、炭素鋼基材にレーザ合金化処理を行うことで、Fe/TiC 表面複合層の形成を試みた。合金層は花弁状やデンドライト状の初晶 TiC と微細共晶 TiC が分散した組織であり、TiC 率増加にともなって、合金層の硬さ、耐摩耗性は向上し、合金層は基材の焼入れ部より 2 倍以上耐摩耗性の向上を得た。
- (4) Ti、Nb、V の各粉末をそれぞれグラファイト粉末と混合し、炭素鋼基材上でレーザ合金化処理を行うことで Fe/MC 表面複合層の形成を試み、いずれの合金層においても炭化物の形成と耐摩耗性の向上が認められた。これらの炭化物分散状態やマトリクス組織の違いは Thermo-calc による計算状態図の結果とよい一致を示すことが分かった。

以上の研究成果は、レーザ合金化における炭素鋼や Ti の表面層の組織制御の新たな可能性を明らかにしたものであり、高付加価値製品を生み出すレーザ合金化プロセスの実用化に大きく貢献するものである。その知見は、マテリアル工学の立場から有益な結果を提供するものである。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。