

レーザーメタルデポジションによるめっき複合炭化物を含有した 高硬度肉盛層形成技術の開発

地方独立行政法人 大阪産業技術研究所
加工成形研究部 部長 萩野 秀樹
加工成形研究部 主任研究員 山口 拓人
加工成形研究部 主任研究員 四宮 徳章
技術サポートセンター 主幹研究員 小栗 泰造
(平成 29 年度 一般研究開発助成 AF-2017226)

キーワード：レーザーメタルデポジション，炭化物，高硬度肉盛層

1. 研究の目的と背景

近年、高張力鋼板や CFRP といった加工困難な高強度材料が自動車業界をはじめ多くの業界で利用されており、それらを加工するための金型や工具の耐久性向上が強く望まれている。金型などの耐久性を向上させるためには、耐摩耗性に優れた材料を利用する必要があるが、こうした材料は一般的に高価であるため、金型全体に適用した場合にはコストが高くなるといった課題がある。一方、耐摩耗性を付与するための表面処理に関する技術開発も積極的に行われている。しかし、既存の表面処理には、処理層の厚さが薄い、皮膜と基材の密着力が弱い、特別な処理雰囲気を必要とする場合は処理対象物のサイズに制約が生じるといった課題があり、これらを解決する新たな技術の開発が望まれている。

レーザーメタルデポジション (Laser Metal Deposition, 以下 LMD) は、処理対象物の特定箇所にも所望の素材粉末を供給しながらレーザーを照射し、肉盛層を形成することが可能な表面処理技術である。大気中で処理できるため対象物のサイズの制約がほとんどない、基材との密着性に優れている、肉盛を繰り返すことで厚い肉盛層 (0.1 mm ~ 数 mm) を形成できるといった利点を有している。また、摩耗が激しい部位などの必要な箇所だけに肉盛することができるため、高価な材料の使用も必要最小限に抑えることができるという特長もある。このため、LMD は耐摩耗性を必要とする金型や工具の新しい表面処理技術として期待されている。特に、肉盛層のマトリクス(コバルト合金等)に硬度の高い炭化物(炭化タングステン等)を含有した肉盛層は、耐摩耗性に優れた理想的な肉盛層であり、LMD を利用することにより、このような肉盛層の形成も可能である。

しかしながら、LMD を用いて高硬度の肉盛層を形成する場合、熱応力に起因する割れが肉盛層に発生しやすい

ことが大きな課題となっている。先述の炭化物を含有した肉盛層を LMD で形成する場合、熔融したマトリクスの温度が炭化物の融点以下であっても、炭化物の表面がマトリクスの融液と接していると炭化物の溶出が起り、肉盛層のマトリクスが硬化し、割れ感受性が高くなることが知られている¹⁾。耐摩耗性に優れた肉盛層を形成するためには、炭化物を溶出させることなくマトリクスになる金属のみを熔融させる必要があるが、実現可能な LMD の条件範囲は狭く、安定した肉盛層の形成は困難である。また、処理対象物を数百℃に予加熱した後、肉盛することも検討されているが、作業が煩雑なため実用化の障壁となっている。予加熱を行うことなく割れのない高硬度の肉盛層を形成する技術の開発が切望されている。

本研究では耐摩耗性に優れた高硬度肉盛層を得るために、硬度の高い炭化物を含んだ肉盛層をレーザーを用いて形成する新しい表面処理技術の開発を目的とした。マトリクスの融液と炭化物が接している場合、先述のとおり、炭化物が溶出し、割れの要因となる。そこで、本研究では、マトリクスと炭化物の接触を避けるため、めっきを施した炭化物の利用を試みた。肉盛時に、めっき成分がマトリクス中に溶出したとしても、炭化物の表面がマトリクスの融液と接触する前に凝固を完了させることができれば、炭化物の溶出は抑制可能と考えられる。

はじめに、肉盛層の割れ抑制に及ぼす、めっきの効果について検証した。肉盛層のマトリクスは、コバルト基合金とし、炭化物には表面にニッケル系のめっきを施したものをを用いた。

LMD のパラメータには、レーザーパワー、肉盛ヘッド送り速度、マトリクスとなる粉末、および炭化物の粉末供給量がある。これらのパラメータには密接な相関があり、最適条件を決定するためには多くの実験が必要となる。また、粉末にめっきを施しても、パラメータ (以下、加

工条件)が適正でなければ割れが発生する可能性がある。そこで、本研究では最適な加工条件についての基礎的な実験を行うとともに、熱応力シミュレーションによって最適な加工条件を決定する技術についても検討を行った。

2. めっきを施した炭化物を利用した肉盛

2.1 実験方法

肉盛に使用した炭化物は炭化タングステン(以下, WC, 粒径約 70 μm)で、その表面にめっきを施した。めっきの種類は融点が比較的高いニッケルボロンめっき(Ni-B, 厚さ約 2 μm)とした。マトリクスにはコバルト基合金ステライト6(粒径 53 μm ~ 150 μm)を用い、基材には厚さ 10 mm, 大きさ 100 mm × 100 mm の鋼板(材質 S50C)を用いた。

レーザには、レーザライン社製の半導体レーザ(LDM 2000-60)を用いた。レーザの最大出力は 2 kW, スポット形状は 5 mm × 5 mm である。レーザ肉盛ヘッドにはブラウンホーフ製の COAX-12 を用いた。粉末の供給には GTV 社製の粉末供給装置を用い、キャリアガスにはアルゴンガスを用いた。また、肉盛中は肉盛ヘッドのノズルからシールドガスとしてアルゴンガスを 20 L/min. 供給した。

2.2 めっきの効果の確認

レーザパワーの設定値 1.2 kW, ヘッドの送り速度 10 mm/s, 粉末供給量ステライト6:約 6.5 g/min., WC:約 5.0 g/min. の条件で 3 層肉盛した試料(肉盛長さは 70 mm, 肉盛高さ約 1 mm)のカラーチェック後の表面写真を図 1 に示す。図では、割れが存在した箇所を矢印で示している。(a)はめっきを施していない炭化物を使用した結果、(b)はめっきを施した炭化物を使用した結果である。めっきを施すことにより、割れの数をや約半分に低減させることができている。

肉盛層組織の SEM 写真を図 2 に示す。(a)はめっきを施していない炭化物を使用した結果、(b)はめっきを施した炭化物を使用した結果である。(a)の組織は、白い粒状のものと白いデンドライト状のもの、およびグレーのマトリクスで構成されている。(b)も同様の組織になっているが、デンドライト状のものは少ない。

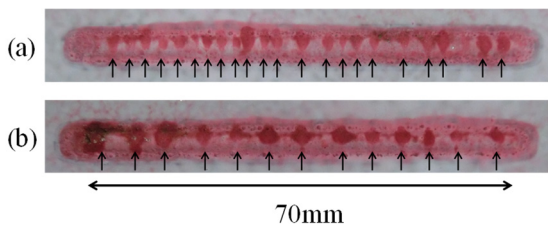


図 1 肉盛層表面写真

(a) めっきを施していない炭化物使用, (b)めっきを施した炭化物使用

エネルギー分散型 X 線分析装置 (EDX) を用いて成分を調べた結果、白い粒状のものからはタングステン(以下, W)と炭素(以下, C)が検出され、デンドライトからは W が多く検出された。この結果から、粒状のものは未溶解の WC であり、デンドライトは肉盛時に WC 粉末の一部がマトリクス中に溶出し、凝固時に再び炭化物として晶出したものと考えられる。(b)の場合は、めっきにより炭化物の溶出が抑えられたことにより、デンドライト状の晶出物が少なくなったと考えられる。また、めっき層は見られず、溶けてしまったものと考えられる。

それぞれのマトリクスの成分を EDX で分析した結果を表 1 に示す。めっきありの場合は、めっきなしと比べ、W の値が 10 %程度小さくなっており、めっきにより WC の溶出が抑えられたことがわかる。ただ、ステライト 6 の W 含有量約 5 wt%と比べると、W の量は増えていることから、WC の溶出を完全に抑えることはできていない。

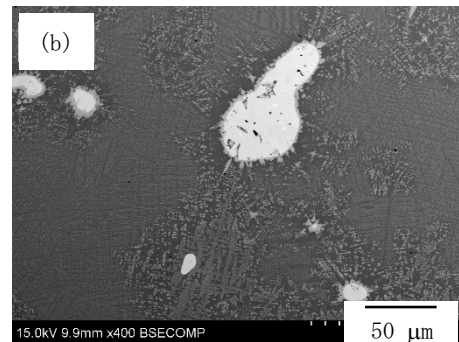
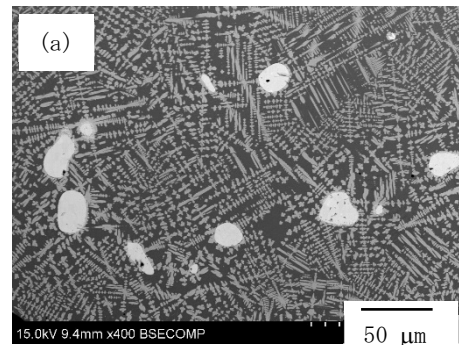


図 2 肉盛層組織の SEM 写真

(a) めっきを施していない炭化物使用, (b) めっきを施した炭化物使用

表 1 マトリクス成分の EDX 分析結果 (wt%)

	W	Cr	Fe	Co	Ni	その他
めっきなし	38.4	17.4	5.9	35.7	—	2.6
めっきあり	28.8	16.8	6.5	35.1	10.6	2.2

以上の結果から、めっきを施すことによりレーザ肉盛時の WC の溶出を抑えることができ、肉盛層に発生する割れを低減することができたと考えられる。

2.3 加工条件と割れの関係

めっきを施した炭化物を利用することにより、炭化物を含有した肉盛層の割れを低減できることがわかった。次に、加工条件と割れの関係について検討した。実験条件は、レーザパワー（設定値）1.2 kW ~ 1.6 kW、ヘッド送り速度 3 mm/s ~ 10 mm/s、粉末供給量ステライト 6：約 2.6 g/min. ~ 約 13.0 g/min.、WC：約 2.0 g/min. ~ 10.0 g/min.の間で変化させた。なお、粉末の混合比を一定にするために、ステライト 6 と WC の供給量の重量比をステライト 6：WC = 1.3:1 で固定した。また、肉盛高さを、ある程度等しくするためにヘッド送り速度と粉末供給量の比を一定にした。肉盛長さと同層数は前節と同じく、それぞれ 70 mm、3 層とした。

光学顕微鏡を用い、肉盛層長さ 70 mm あたりの表面の割れ数を測定した結果を図 3 に示す。図中の A~D は表 2 に示す加工条件に対応している。条件 A~C は、めっきを施した炭化物を使用しており、条件 D は、めっきを施していない炭化物を使用している。条件 A と条件 D は、めっきの有無以外は同じ加工条件である。

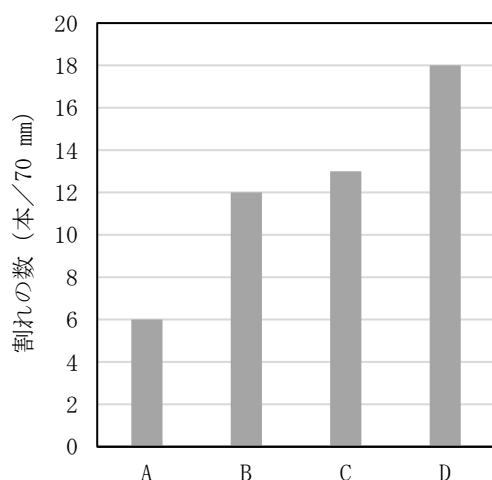


図 3 各加工条件での割れ数の測定値

条件 A と条件 D を比較すると、条件 D の割れの本数は条件 A の 3 倍であり、炭化物へのめっきが割れ抑制に効果があることを改めて確認することができた。

また、条件 A~C を比較すると、ヘッドの送り速度が遅いほど割れの本数が少なくなっていることがわかる。この要因としては、送り速度が遅いほど、基材への入熱が大きく、基材を予熱する効果があったことが考えられるが、今後、詳細に検討を行う必要がある。

3. 割れ低減のための加工条件の検討

3.1 加工条件と変形量の関係

前節において、加工条件により、割れ発生頻度が変わることを明らかにした。レーザ肉盛で割れが発生する要因として、肉盛後の冷却過程において基材の収縮量と肉盛層の収縮量が異なるために発生する残留応力が考えられる。したがって、残留応力が小さくなる条件で肉盛を行うことで、肉盛層に発生する割れの本数を減らすことができると考えられる。肉盛層の残留応力を直接測定することができれば、残留応力が小さくなる加工条件の検討も容易であるが、肉盛層の残留応力を直接測定することが困難であったため、薄い基材に肉盛を施し、基材の変形量から相対的に残留応力が小さくなる加工条件について検討を行った。

肉盛実験について以下に述べる。マトリクスにはコバルト合金ステライト 6（粒径 53 μm ~ 150 μm）を用い、基材には厚さ 4 mm、大きさ 25 mm × 100 mm、材質 SUS304 の板を用いた。レーザ肉盛装置は、前章の実験と同じシステムを用いた。キャリアガスおよびシールドガスについても前章と同様にアルゴンガスを用い、肉盛中はシールドガスとして肉盛ヘッドのノズルからアルゴンガスを 20 L/min. 供給した。

図 4 に、レーザパワーを 1.6 kW（設定値）で一定とし、ヘッドの送り速度と粉末供給量を種々変えた加工条件で得られた肉盛層の高さと変形量の関係を示す。また、この変形量の定義を図 5 に示す。図 5 は肉盛した試料の縦断面の模式図であり、変形量は基材裏面の中心から肉盛方向に平行に 40 mm 離れた位置での変形量とした。

図 4 から、ヘッドの送り速度にかかわらず、肉盛高さが高いほど変形量が大きくなるという傾向が見られる。また、4 mm/s 以上の速度では、多少のばらつきはあるものの変形量にあまり差はないが、2 mm/s の速度の場合は

表 2 加工条件

条件	レーザパワー (kW)	ヘッド送り速度 (mm/s)	ステライト 6 供給量 (g/min.)	WC 供給量 (g/min.)	炭化物へのめっき
A	1.2	3.0	3.9	3.0	あり
B	1.2	5.0	6.5	5.0	あり
C	1.6	10.0	13.0	10.0	あり
D	1.2	3.0	3.9	3.0	なし

4 mm/s 以上の場合と比べ、変形量が小さいという結果が得られた。この結果は、2・3 節の実験結果（条件 A の場合は、条件 B, C と比べ、割れの数が少ない。条件 B と条件 C の割れの数にはあまり差がない）とも整合している。ただし、この傾向については、データの数が少ないため、今後、さらに実験を行い、データを増やして検討を行う必要がある。

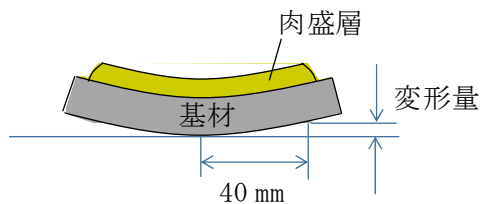


図5 変形量の定義

3.2 レーザ肉盛りに関するシミュレーション

実験により、割れや変形の少ない最適な加工条件を求めることは、時間を含め多くのコストが必要となるため、シミュレーションの活用が期待されている。そこで、熱応力シミュレーションによる加工条件の最適化について検討を行った。

計算力学研究センター社製 3 次元熱応力解析ソフト Quick Therm を用い、前節の実験結果をもとにシミュレーションを行った。

はじめにレーザーパワーの吸収率を見積もった。実際に肉盛実験に用いる試料と同じものにレーザー光を照射し、温度変化を測定した。その測定結果と伝熱シミュレーションによる温度変化を比較することで、吸収率を 49.4 % と見積もった。

肉盛高さを変形量の関係についてのシミュレーション結果を図 6 に示す。図 4 と図 6 を比較した結果、変形量の絶対値には差があるが、肉盛高さが高いほど、変形量が大きくなるという傾向が実験結果とシミュレーション結果とで一致した。また、送り速度が 2 mm/s の場合は、4 mm/s 以上の送り速度の場合と比べて変形量が小さいことや送り速度 4 mm/s と 6 mm/s の場合は変形量にあまり差がないといった点が実験とシミュレーションで同じ傾向を示している。以上より、シミュレーションを利用することで、加工条件の最適化が、ある程度可能だと考えている。

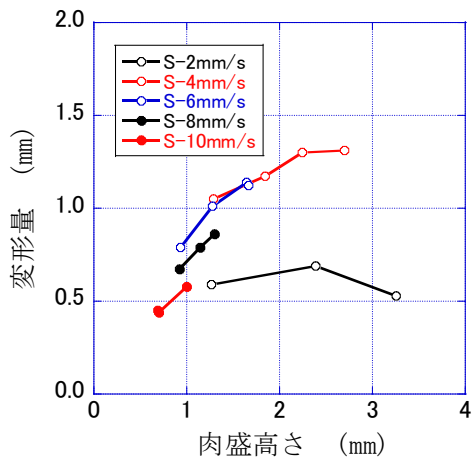


図6 肉盛高さを変形量の関係についてのシミュレーション結果

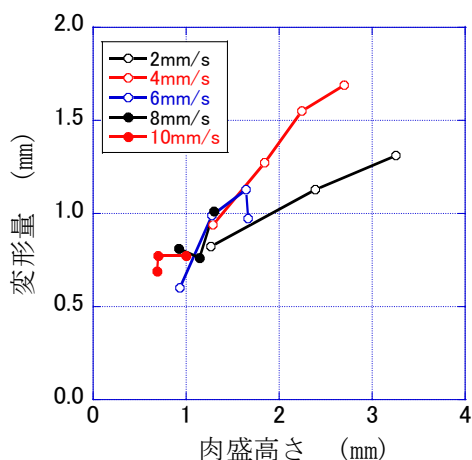


図4 各種加工条件での肉盛高さを変形量の関係

4. まとめ

本研究では、レーザーメタルデポジションにより、硬度の高い肉盛層を割れなく形成するための技術について検討を行った。その結果、めっきを施した炭化物を利用することにより、割れ数を低減することに成功した。

実験した条件の範囲では、割れを少なくする、あるいは変形を小さくするためには、肉盛ヘッドの送り速度は遅い方がよいという結果が得られた。しかし、速度が遅い場合、希釈率や基材のダメージが大きくなる恐れもあるため、最適な加工条件については、異なる観点からも検討を行う必要がある。また、熱応力シミュレーションを利用した加工条件の最適化についても、ある程度の可能性を示すことができた。

謝辞

本研究は、公益財団法人天田財団の平成 29 年度一般研究開発助成によるものです。ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) S. Zanzarin, S. Bengtsson and A. Molinari : J. Laser Appl., 27, (2015), S29209.