

レーザー照射による LMD 肉盛層の特性改善

福山 遼 (情報・生産技術部 試作加工グループ)

中村 紀夫 (情報・生産技術部 システム技術グループ)

薩田 寿隆 (情報・生産技術部長)

1. はじめに

モノづくりのデジタル化に伴い、設計データ (3D-CAD) を直接入力して部品を得る積層造形技術 (3D プリンティング) が注目されている。金属材料を用いた金属 3D プリンティングにおいては、その市場規模は 2030 年には約 2 兆円と予測されており、現在では医療、航空・宇宙、発電分野で先行実装されている¹⁾。

金属 3D プリンティングの中でも、レーザー粉体肉盛溶接 (Laser Metal Deposition : LMD) はレーザー照射してできた溶融池に金属粉末を送り、肉盛溶接を行う技術である。LMD は母材希釈が少なく、低入熱量であり、肉盛厚さを正確に制御できることから、局所的な肉盛層の形成が容易となる。現在では、タービン翼や金型などの高付加価値の金属部材の補修として期待されており、金属ブロックからの削り出しによる作製に比べて製造コストの削減が見込める。

金型を対象と考えると、補修を行うに際して高速度工具鋼を用いることが想定されるが、LMD で肉盛溶接を行った高速度工具鋼の肉盛層は、場所により硬さに変動が生じる。この硬さ変動を抑えつつ溶接ままよりも硬化させるために別工程で炉内熱処理を行う必要もあり、製造コストの増加や製作期間が長くなる要因になる。

そこで本研究では、LMD 装置のみで肉盛溶接と熱処理を行う加工法を新たに考案した。本手法を用いて、LMD で肉盛した高速度工具鋼の硬さ変動の軽減と、より硬さの大きい高機能的な溶接部の形成を行った。

2. 実験及び結果

本研究で用いた LMD 装置 (TRUMPF 製 : TruDisk3006) の概略を述べる。発振器から発したレーザー光 (ディスク発振の YAG) は光ファイバーで伝送され、ロボットアーム先端に設けた出射光学系により集光され、対象物表面を溶融する。粉末は供給装置からアルゴンガスにより搬出され、出射光学系先端のノズル内に設けた出射口から溶融部に供給される。レーザー照射と同期してロボットアームは移動し、目的とする形状の肉盛層を形成する。

表 1 に LMD の積層条件を示す。粉末は粒径 53-150 μm の高速度工具鋼 SKH51 を使用した。表 2 に粉末の化学組成を示す。基材は一般構造用圧延鋼材 SS400 を用いた。これらの条件で 1 層 5 パス (ラップ幅 2mm) の肉盛層を形成した。

続いて、硬さ変動を軽減させるために LMD 装置を用いた肉盛層のレーザーによる熱処理 (以下、レーザー熱処理) を

試みた。LMD による肉盛加工を行った後に、粉末を供給せずレーザー (ビーム径 $\phi 4 \text{ mm}$ 、走査速度 5 mm/s) のみを各パスの肉盛面の真上から再照射した。レーザー熱処理の回数は 5 パスで 1 回と定義し、これを 1、2、4、6 回行った。

評価方法は光学顕微鏡による金属組織観察とマイクロビッカース硬さ試験機による硬さ試験 (試験力 100 gf) を用いた。試験片はワイヤ放電加工で断面切断後に樹脂に埋め込み研磨し、ピレラ試薬によるエッチング処理を行ったものを使用した。

表 1. LMD の積層条件

レーザー出力 (kW)	2
ビーム径 ϕ (mm)	4.0
キャリアガス流 (ℓ/min)	2.1
シールドガス流 (ℓ/min)	23.0
粉末供給量 (g/min)	15.5
レーザー走査速度 (mm/s)	6

表 2. SKH51 粉末の化学組成 (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	W	Fe
0.88	0.22	0.35	0.02	0.01	4.12	4.97	1.77	6.50	Bal.

図 1 にレーザー熱処理を行う前の肉盛断面の光学顕微鏡像と硬さ分布を示す。各パスにエッチングによる組織の濃淡の違いが見られ、この金属組織の違いがそのまま硬さの変動に繋がっているのが分かる。3 パス以降の硬さの変動は少なく、最高で 833 HV の硬さを得たが、1 パスから 2 パスは硬さが低く最低で 685 HV であった。また、1 パスから 5 パスまでの平均硬さは 785 HV、硬さの標準偏差は 40.3 であった。

硬さの変動を低減し、更なる硬さの増加を狙うために肉盛層へのレーザー熱処理を行った。図 2 にレーザー熱処理回数に伴う肉盛断面の平均硬さと硬さの標準偏差の推移を示す。また、代表例としてレーザー熱処理を 2 回行ったときの肉盛断面の硬さ分布と光学顕微鏡像を図 3 に示す。レーザー熱処理を 2 回以上行うことで、レーザー熱処理前の肉盛層に比べエッチングによる組織の濃淡は少なくなった。レーザー熱処理を 2、4、6 回行ったときの平均硬さは 851 HV、硬

さの標準偏差は 25.7 となり、レーザ熱処理前に比べ硬さが 66 HV 増加し、硬さの標準偏差は 14.6 低減された。

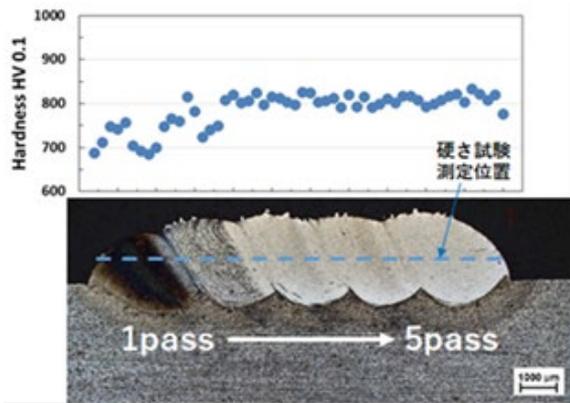


図 1. レーザ熱処理前の肉盛断面の硬さ分布と光学顕微鏡像

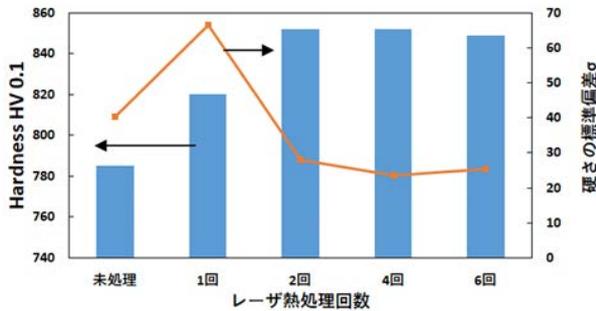


図 2. レーザ熱処理回数に伴う肉盛断面の平均硬さと硬さの標準偏差 σ の推移

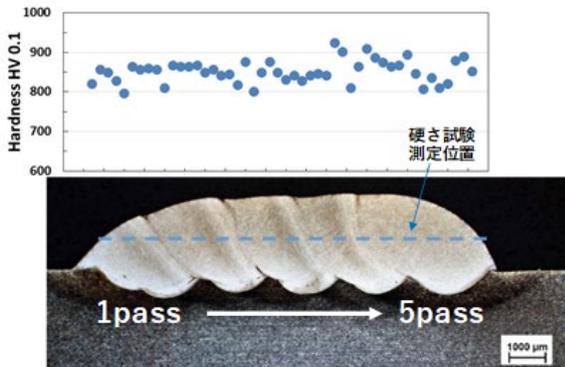


図 3. レーザ熱処理 2 回の肉盛断面の硬さ分布と光学顕微鏡像

3. 考察

図 1 に見られる肉盛ままの組織の濃淡の違いと硬さの変動について図 4 を用いて考察する。1 パスは試験片温度が室温でのレーザ照射であったため、マルテンサイト変態開始点 (M_s 点) 以下に冷却された後に、後続パスの昇温による焼戻し状態で炭化物が析出し、濃くエッチングされたと考えられる。2 パスもほぼ同様な現象が生じていると考えられる。また、1、2 パスの各硬さ分布を見ると、各パス中央部の硬さが高くなっている。硬さが増加した所は後続パスからの距離が遠く到達温度が低いため二次硬化が起き、硬さが低下した所は後続パスからの距離が近く到達

温度が高いため軟化したと考えられる。また、3 パス以降の硬さが 800 HV 程度で維持されているのは、1、2 パスの形成により試験片温度が上昇し、更に後続パスの入熱により M_s 点以上に保持され、オーステナイト組織のまま最終 5 パスの加工が終了し、5 パスの加工終了後の冷却時に 3 から 5 パスが一齐にマルテンサイト変態したと考えられる。このように 3 から 5 パスは同程度の熱履歴を経たため同じようなエッチングの濃さと硬さを得たと考えられる。

一方、レーザ熱処理を 2 回以上行ったときは、レーザ照射の回数増加に伴い試験片温度が M_s 点以上に昇温保持されていたため、一部を除きほとんどの領域がオーステナイト組織に維持され、レーザ照射終了後の冷却時に全てのパスが一齐にマルテンサイト変態したと考えられる。しかし、図 3 の硬さ分布を注視すると、硬さが低下している箇所があり、これは図 1 の肉盛ままの時とほぼ同じ箇所の硬さが低下しているのが分かる。硬さが下がる程の温度履歴を受けた場合、オーステナイト域まで達しない焼戻し処理はそのまま低い硬さを維持する。また、本研究の熱処理は肉盛層全体を均一かつ高精細に温度制御されているのではなく、レーザの中心 (約 1300 °C) が照射されている肉盛面と、レーザ中心に比べ温度が低いレーザ端が照射されている肉盛面に分かれる。従って、レーザ照射とその熱伝導によってオーステナイト域まで昇温されなかったため硬さの低下を招いたと考えられる。この対策として、LMD による肉盛時と同じ照射位置である各パスの真上からレーザ照射せずに、硬さの低下を招く箇所はレーザの中心が照射されるように走査し、オーステナイト域まで昇温させる必要があると推察される。

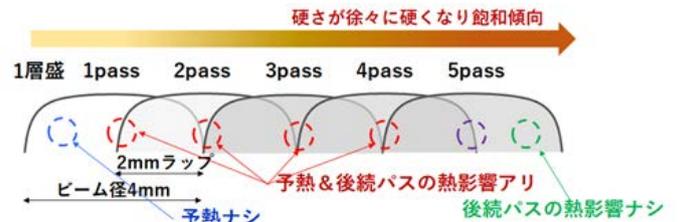


図 4. LMD による各パスの温度履歴の違い (肉盛断面)

4. 今後の展開

レーザ熱処理を行うことで 1 パスから 5 パス全ての領域でエッチングによる組織の濃淡が均一化され、硬さの変動が低減された。更に、熱処理による硬さの上昇効果も得られた。今後は、レーザの照射条件であるスポット径、走査速度、出力、レーザ照射位置などを調整することで、肉盛層の内部組織を均質化させつつ任意の硬さに調整できる熱処理手法の開発を目指す。

【参考文献】

- 1) 井関隆之：金属積層造形プロセス概要，第 3 回 NEDO 『TSC Foresight』セミナー発表資料 (2019)。

【外部発表】 口頭発表 1 件， 特許出願 1 件