

指向性エネルギー堆積法(DED)を用いた 金型材料の補修技術に関する研究

山田 泰希^{*1} 菊竹 孝文^{*1}

Study on Repair Technologies for Die Materials Using Directed Energy Deposition (DED)

Taiki Yamada and Takafumi Kikutake

指向性エネルギー堆積(Directed Energy Deposition : DED)方式は、三次元造形に加え、既存部品に付加造形で
きることから、金型のカケや摩耗が生じた箇所に、必要な機能性を付与できる技術として期待されている。本研
究では、プレス金型材料である合金工具鋼(SKD11)に対して、耐摩耗性・靱性の優れる高速度工具鋼(SKH51)を堆
積し、接合界面をの硬度分布および金属組織について調査した。

1 はじめに

金属AM技術の一方式である指向性エネルギー堆積
(Directed Energy Deposition : DED)方式は、レー
ザ光によって粉末層を選択的に溶融する粉末床溶融結
合法(Powder Bed Fusion : PBF)とは異なり、金属
粉末とレーザエネルギーを同時に供給し、母材上に金
属を堆積する手法である。本手法は、密度と冶金的結
合に優れ、母材への影響を最小限に抑えられ、精密な
堆積が可能であることから、高付加価値部品の補修に
最適な手法であると考えられている。

合金工具鋼であるSKD11は、高い硬度を有し、良好
な機械的特性を示すため、冷間プレス金型をはじめと
する金型部品の製造に広く使用されている。しかしな
がら、近年の自動車産業における安全性や軽量化の要
求から、先進高強度鋼を含む鋼材の板金成形時に発生
する破損、割れ、および早期摩耗が課題となっている。

本研究では、合金工具鋼SKD11の高機能化を目的に、
耐摩耗性に優れる高速度工具鋼SKH51を堆積し、DEDに
よる造形が母材および堆積層の金属組織、硬さに与え
る影響について調べた。また、SKD11およびSKH51の接
合部材に最適な熱処理条件についても検討した。本
報告は、先に文献1)で報告した内容を基に、詳細な評
価と考察を加えたものである。

2 実験方法

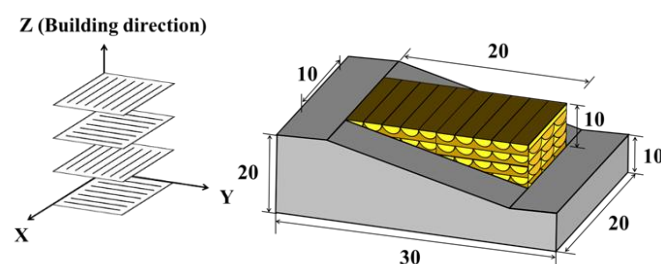
実験に用いた装置は、半導体レーザを搭載した株式
会社ニコン製の「Lasermeister 100A」(最大出力200W)
を使用した。母材には、合金工具鋼SKD11を使用し、

造形材料は、高速度工具鋼SKH51の金属粉末を使用し
た。積層条件(レーザ出力、走査速度、積層ピッチ)は、
表1に示す値とした。高速度工具鋼は、耐摩耗性・耐
衝撃性に優れ、高負荷・高温環境で使用される金型や
各種工具に使用されている。図1に示すように、レー
ザ走査パターンは各層ごとにX方向およびY方向を交互
に変更する方法を採用した。図2に試験片の作製方法
を示す。母材上の傾斜した領域に、SKH51を堆積し、
ワイヤ放電加工によって母材と造形材を含む領域の中
央部を長手方向に切断した。湿式研磨による鏡面研磨
後に、10%ナイトール溶液でエッチングを行い、光学
顕微鏡を用いて組織観察を行った。また、As built材
の組織を、走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて観察した。

造形後の熱処理として、表2に示す条件で焼入れと
焼戻しを行った。焼入れ温度は、SKH51で一般的に採
用されている、1170℃に加え、SKD11およびSKH51両方
で高い硬度が得られる条件を検討し²⁾、1080℃とし
た。硬度試験はビッカース硬度計を使用し、試験荷重
300 gf、保持時間15 sとした。

表 1 積層条件

Laser power	W	150
X Y Scan speed	mm/s	3.0
Layer thickness	mm	0.1
Powder Supply	g/min	2.0



^{*1} 機械電子研究所

図 1 レーザ走査パターン¹⁾ 図 2 試験片の作製方法¹⁾
表 2 熱処理条件

Conditions	Heating	Cooling	Tempering
As built	None	None	None
T550℃	None	None	550℃
H1,170℃-T550℃	1,170℃	Air cooling	550℃
H1,080℃-T550℃	1,080℃	Air cooling	550℃

3 結果と考察

3-1 断面組織

図3に、As built材の断面組織写真を示す。堆積層において、レーザの走査方向の違いに起因するコントラストが観察され、溶融池中心部は溶融池境界部に比べて強くエッチングされた。なお、母材において強くエッチングされた領域は、熱影響部であると考えられる。溶融池の境界部および中心部をSEMで観察した結果を図4に示す。両領域ともに、高速度工具鋼の凝固組織に見られるデンドライト間隙に生成したネットワーク状の共晶炭化物が見られた。しかし、組織形態には差異が認められ、境界部では造形方向に伸びた柱状晶が多く観察されたのに対し、中心部では等軸晶が支配的であった。

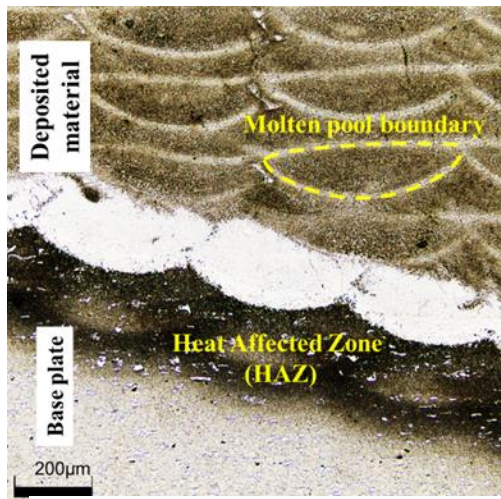


図 3 As built 材の断面の光学顕微鏡写真¹⁾

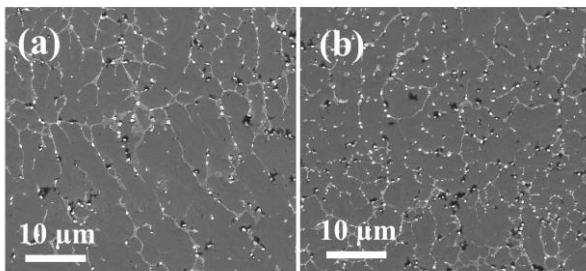


図 4 SEM 像 (a) 溶融池境界部 (b) 溶融池中心部¹⁾

3-2 堆積層の硬度分布

溶融池の中心部と境界部における硬度の差異を明らかにするため、As built材の堆積層において微小硬度試験を行った。図5に示すように、100 μm間隔で計25点のビッカース硬度を測定した。図中の破線は、溶融池の境界を示す。

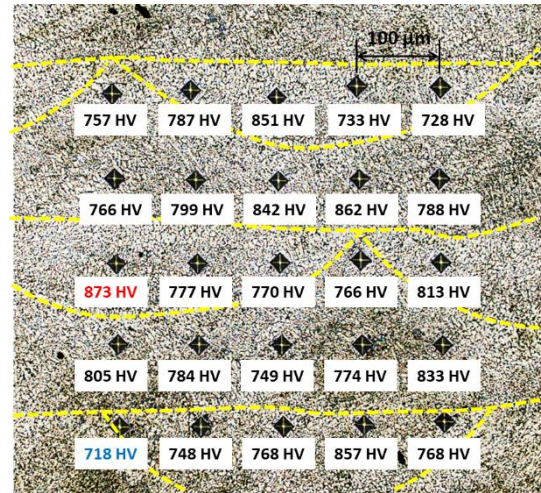


図 5 As-built 材の堆積層断面における
ビッカース硬度分布

測定の結果、25点の平均硬度は789 HVであった。最大値は溶融池中心部で観察された873 HV、最小値は溶融池境界部で観察された718 HVである。この結果から、測定箇所によって最大で約155 HVの硬度差が生じていることがわかる。全ての測定点が700 HV以上という高い硬度を示したものの、溶融池の中心部と境界部では機械的性質にばらつきが生じる可能性が示唆された。この硬度分布の不均一性は、積層プロセスにおける不均一な熱履歴に起因すると考えられる。DEDでは、新たな層が積層される際に、その直下の層が再加熱される。溶融池の境界部は、この上層の積層時の熱影響を強く受けることで焼戻し効果が生じ、組織が軟化したために硬度が低下したと推察される。したがって、堆積層は硬い中心部と比較的軟らかい境界部が混在した不均一な状態となっていると考えられる。

3-3 熱処理による硬度変化

各種熱処理が母材と堆積層の界面近傍の硬度分布に及ぼす影響を調査した。図6に、各熱処理条件における界面からの距離と硬度の関係を示す。As built材では、境界部近傍が軟化しているのに対し、焼戻しのみを行うことで、境界部を含む全体の硬度が690 HV

(HRC 59相当) 以上となることが確認できた。一方、1,170℃で焼入れを行った場合、SKH51の硬度は880 HV以上に上昇したものの、SKD11には一般的な焼入れ条件(約1,050℃)より100℃以上高いため、硬度が400 HV程度まで軟化した。これは、焼入れ温度が高すぎたことで、残留オーステナイト量が増加したことが原因と考えられる。1,080℃で焼入れを行った試験片では、SKD11およびSKH51の両方で750 HV (HRC 62相当) 以上の硬度であった。堆積層の硬度は、As built材および焼戻し材に比べ、わずかに低いものの、高速度工具鋼において、靱性の向上を目的に、通常より低い温度で焼入れを行う「アンダーハードニング」と呼ばれる熱処理法が適用される場合もあり、プレス金型で使用する場合には耐衝撃性の面で有利となる可能性がある。

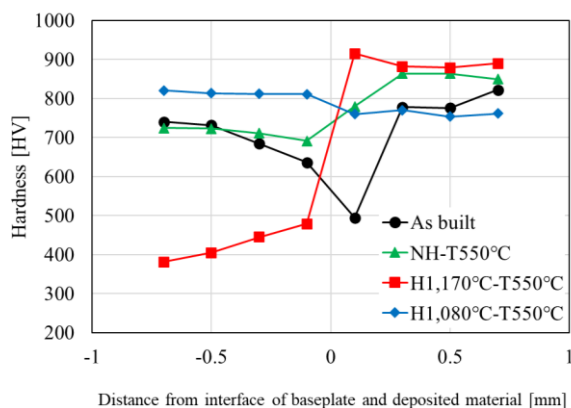


図6 各熱処理条件の違いによる硬度試験の結果¹⁾

4 まとめ

- (1) 堆積層の凝固組織は、デンドライト及びデンドライト間隙に生じた共晶炭化物から構成され、溶融池の境界部と中心部で組織に違いがみられた。
- (2) As-built 材の堆積層は溶融池中心部で硬く境界部で軟化する不均一な硬度分布を示した。
- (3) 母材、堆積層、接合部を含む全体の硬度は、造形後 550℃で焼戻しを行った場合、690 HV 以上である。また、1,080℃で焼入れ後に 550℃で焼戻しを行った場合は、750 HV 以上である。

5 謝辞

本研究は、公益財団法人三井金型振興財団の研究助成によるものであり、ここに付記して深く感謝の意を表します。

6 参考文献

- 1) 山田 泰希：精密工学会学術講演会講演論文集，2025年度精密工学会春季大会，pp. 509-510 (2025)
- 2) 杉山 道生：合金工具鋼(SKD)の焼入加熱時間と機械的性質の関係．鉄と鋼，60巻，1号，pp. 85-95 (1974)