

# レーザー積層造形した Ti6Al4V 合金の耐エロージョンに対する HIP 処理効果

Effect of HIP treatment on micro slurry erosion resistance for Ti6Al4V alloy additively manufactured by laser beam melting

金属技研（正）\*伊藤 祥太郎 金属技研（非）尾ノ井 正裕 福井大（正）岩井 善郎

Ito Shotaro\*, Onoi Masahiro\*, Iwai Yoshiro\*\*

\*Metal Technology Co. Ltd., \*\*University of Fukui

## 1. はじめに

1980年に国内で初めて、光積層造形技術が考案され、2013年より国内でも金属積層造形装置の導入が活発に行われてきた。今日、金属積層造形体の引張強度、回転疲労強度、クリープ特性など機械特性に関する多くの報告がなされている。一方で、金属積層造形は、電子ビームまたはレーザー光等を熱源として、金属粉末の熔融凝固過程を繰り返して立体形状を形成する。その過程で溶接プロセスに見られるような応力腐食割れや表面の摩耗に対する強度低下が考えられるが、コロージョンやエロージョンに関する特性の報告は少ない。そこで、我々は、レーザー光による金属積層造形試験片を用いて、岩井らが開発したマイクロスラリーエロージョン（Micro Slurry-jet Erosion : MSE）試験<sup>1)</sup>を行い、金属積層造形体に対する MSE エロージョン特性を明らかにするとともに、その材料改質の方法として HIP 処理の影響を検証した。

## 2. 実験方法

金属技研が所有している EOS M280 (Fig. 1) を用いて、EOS 社の標準造形レシピを基に、Ti6Al4V 粉末の積層造形体（ $\phi 10 \times 140\text{mm}$ ）の試験片を準備する。同時に、一般的な Ti6Al4V の圧延材も準備し、全体的に両者に HIP 処理を行い、機械特性および MSE エロージョン特性の評価を行う。まず、それぞれ複数本製作した試験片は、丸棒引張試験片に加工され、引張試験される。また、同試験片の一部は、輪切り（軸方向に直角）し表面研磨を行い、同表面を用いて MSE 試験を行う。

Figure 2 は、MSE 試験装置の概略図である。MSE 装置は水に混在させた固体粒子（アルミナ粒子）を投射ガンの中で圧縮空気の膨張によって加速させ、一定速度で試験体表面に投射するよう設計されており、粒子投射ノズル、スラリーポット容器、粒子循環回路から構成されている。平均粒径約  $40\mu\text{m}$  の多角アルミナ粒子 (Fig. 3) は、ノズルから最大約  $100\text{m/s}$  の速度で投射され試験体表面に衝突するので、表面では切削もしくは変形・き裂発生に由来する剥離が繰り返し発生し損傷が生じる。一定量のアルミナ粒子投射を複数回繰り返し、試験体表面のエロージョン痕（クレータ）の中央部の最深点の深さを基に MSE エロージョン率を算出する。MSE 試験は、複数個所で行い評価する。一方で、造形材と圧延材の双方の組織観察も同時に行う。

## 3. 実験結果

Table 1 に積層造形試験片(DMLS)および圧延材(Rolled)の未処理 (as-built と表記) もしくは HIP 処理した試験体の引張強度を示す。全体的に HIP 処理の調質効果が観察され、HIP 処理後は最大引張強度、伸び、硬度が低下している。一般的には、HIP 処理は内部欠陥の除去などに用いられるが、同時に試験体への熱処理効果も現れている。Figure 4 は、積層造形および圧延で準備した試験片の組織写真である。DMLS(as-built)では、急冷凝固過程のため微細な結晶粒が観察されるが、DMLS(as-built+HIP)では、HIP 処理の熱処理効果によりラメラ状の組織が観察された。一方、圧延材では、HIP 処理前の押しつぶされたような組織から、HIP 処理後には結晶粒の成長が観察され

高精度レーザー造形機 EOSINT M280



照射熱源:ファイバーレーザー  
造形エリア (mm):  $250 \times 250 \times 325$   
適応材質: Ti-6Al-4V, Alloy718  
特徴: 高精度造形, 複雑流路造形

Fig.1 Direct Melting Laser Sintering



Fig.2 Schematic diagram of MSE apparatus

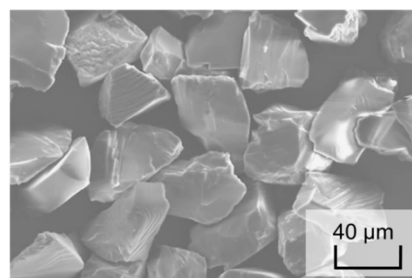


Fig.3 Average MSE erode media

Table 1 Samples and their Mechanical Properties

		$\sigma_{\text{UTS}}$ (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HV0.05)
DMLS	as-built	1176	14	378
	as-built+HIP	980	22	340
Rolled	as-built	937	14	371
	as-built+HIP	894	15	360

た。以上のように、DMLS および圧延で準備された試験片は、HIP 処理によって、その機械的強度は調質効果によって低下し、組織変化ならびに結晶粒の成長が観察された。

次に、そのような特徴を示す試験片に対して MSE 試験を行った。アルミナ粒子 (Fig. 3) 0.8g を一定速度で試験片表面に投射する試験を 4 回繰り返し (合計 3.2g), 各投射で生じるエロージョン深さを計測した。Figure 5 に代表例として、投射アルミナ粒子量に伴う MSE エロージョン痕形状曲線とそれらから計測したエロージョン痕中央部の最深部の深さの変化を示す。線の傾きを MSE エロージョン率として比較した。積層造形された丸棒の底面から異なる位置で切り出した試験片について同様にを行った MSE 試験結果をその面で測定した硬度に対してプロットすると Fig. 6 のようになる。DMLS の as-built と as-built+HIP では、明らかに特性が異なり、HIP 処理なしの as-built では硬いにもかかわらずエロージョン率が高い。一方、HIP 処理を実施した試験片は、HIP 処理による調質効果が考えられ、硬さは小さくなるが、MSE エロージョン率が減少する傾向を示す。これは、HIP 処理により微細結晶が粗大なラメラ状の針状組織となることで、硬度が低下するものの、MSE エロージョンへの耐性は強化されたことを示している。

#### 4. 考察

一般的に MSE エロージョンでは、硬い材料は小さい MSE エロージョン率( $\mu\text{m/g}$ )を示す (例: アルミニウム 4.87, サファイア 0.26, 超硬合金 0.03, ダイヤモンド 0.0003)。ところが、Fig.6 で示されるように、DMLS(as-built)と DMLS(as-built+HIP)の両者を比較すると、DMLS(as-built)の方が硬いが MSE エロージョン率が大きく、その耐性が低い。つまり、DMLS(as-built)は硬くて脆いという性質を示しているが、HIP 処理した DMLS(as-built+HIP)は硬度が小さくなったにもかかわらず MSE エロージョン率は小さく、HIP 処理によって積層造形材としての脆性的性質が改善されたとことを示している。これは結晶組織が数  $\mu\text{m}$  に満たないような DMLS(as-built)の結晶粒径から、20~30 $\mu\text{m}$  程度の針状組織に改質されたことが起因していると考えられる。Table 2 は as-built で算出した MSE エロージョン率の平均値を基準値として、その大小関係の比率を算出した結果である。2 種類の試験片の HIP 処理による MSE エロージョン率を比較すると、圧延材では HIP 処理効果は 1:1.02 と差がほぼないが、積層造形材においては 1:1.12 と差が生じている。DMLS(as-built)材は、HIP 処理による調質効果で軟らかくなり、靱性を示す性質へ改質されたことを示している。

#### 5. おわりに

Ti6Al4V 積層造形 DMLS と圧延材において、それぞれ as-built と as-built+HIP に対して MSE 試験を行い、次のことが明らかになった。

- 1) 積層造形 DMLS(as-built)材は、HIP 処理効果によって調質され組織が変化したため、硬さが小さくなり、MSE エロージョンに対する耐性が強化された。
- 2) 積層造形 DMLS 材は HIP 処理により MSE エロージョン耐性が 1.12 倍強化された。一方、圧延材では 1.02 となり HIP 処理効果は得られなかった。

本研究の一部は、科学技術振興機構(JST)の研究成果最適展開支援プログラム(AS2810325)の支援を受けて実施しました。

#### 文献

- 1) Y. Iwai et al.: Development of a new type micro slurry-jet erosion (MSE) tester for evaluation of wear properties of hard thin coatings, Lubrication Science, 21 (2009) 213-226.

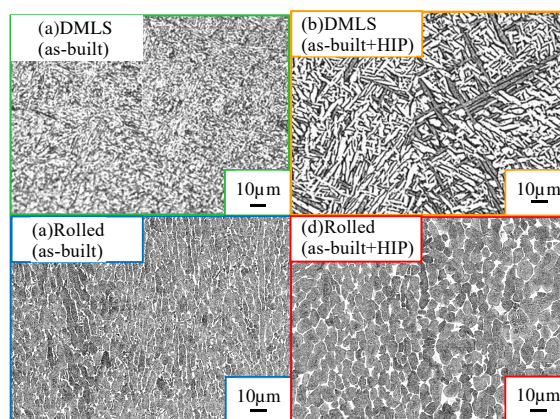


Fig.4 Image for microstructure

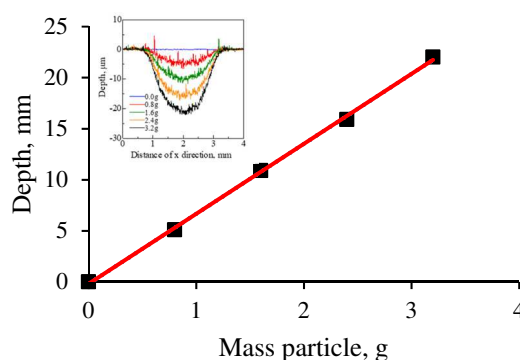


Fig.5 MSE erosion curve and erosion rate

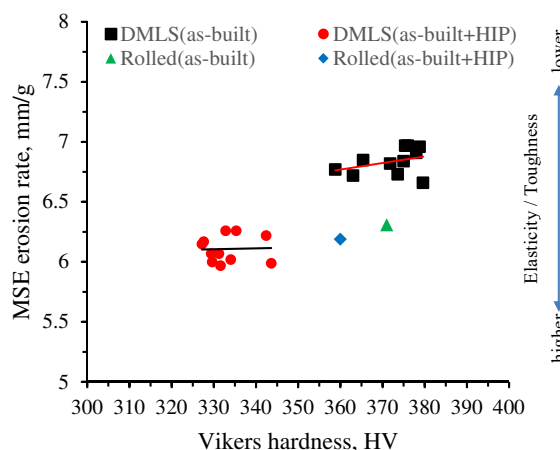


Fig.6 HIP effect for DMLS and/or Rolled test piece

Table 2 Comparison of HIP effects

		Erosion rate ( $\mu\text{m/g}$ )	Effect of HIP
DMLS	as-built	6.84	1
	as-built+HIP	6.13	1.12
Rolled	as-built	6.32	1
	As-built+HIP	6.19	1.02