

## B02 レーザービーム積層造形法により

### 作製した IN 718 の組織と強度特性

堀川将大 (首都大・院), 郭妍伶 (首都大・院), 笈幸次 (首都大)

S. Horikawa (TMU), Y. KUO (TMU), K. Kakehi (TMU)

#### 1. 緒言

Inconel 718(Special Metals の商標. 以後 IN 718 とする)は, 650 °C 以上の高温において良好な機械的特性と微視組織安定性から, 航空宇宙材料として広範囲に用いられている. Platt&Whitney 社製 PW4000 エンジンで使用されている Ni 基超合金の実に 57 % が IN 718 である<sup>(1)</sup>. この航空宇宙分野で幅広く用いられている IN 718 であるが, 難加工材であるにも関わらず, エンジンのディスク材として用いる場合を代表するように, 鍛造後に切削加工を行わなければならない. また, 高価な材料であるが, 切削加工を行うことにより無駄になる材料が多いため, 歩留まりが問題となる. これらの問題を解決するための方法として合理的な製造方法が求められてきた. そこで近年注目されているのが積層造形法である. 設計自由度の高さから, 軽量化, 最適設計による特性向上, リードタイム削減などが期待されている. しかし, 積層造形材は従来材と異なる微視組織を有していることが報告されている<sup>(2)</sup>. 本研究では, レーザービーム積層造形によって作製した IN 718 に対して熱処理が組織及び強度特性に与える影響を解明することを目的とした.

#### 2. 実験方法

本研究では, EOS Nickel 718 合金粉末を用い, アルゴン雰囲気中で EOS M280 によって供試材を造形した. 化学組成は Special

Metals が製造している IN 718 とほぼ同等である. レーザーには Yb ファイバーレーザーを用いることで, スポット径を狭くし, 高エネルギー密度で粉末を凝固・固化させて一辺 35 mm の立方体を造形した. この立方体を厚さ 3.1 mm にスライスし, その板から, 組織観察試料・強度試験片を放電加工機で切り出した. 積層方向に対して平行に切り出した試料を 0 °面/材, 垂直に切り出した試料を 90 °面/材とする. 造形物から切り出した 2 方向の試験片をそのまま試験に用いた試料を as-built 材, IN 718 の熱処理で一般的に用いられている AMS-5662 規格に従って熱処理を施した試料を標準熱処理(STA)材, AMS-5662 規格のうち, 溶体化処理を行わず, 切り出し後そのまま時効処理を行った試料を直接時効(DA)材とする. これらの試験片を用いて, OM, SEM, TEM を用いて組織観察を行った. 加えて, 強度特性を調べるために, クロスヘッド速度 0.5 mm/min で室温引張試験, 650 °C 引張試験を行い, 550MPa, 650 °C にてクリープ試験を行った.

#### 3. 結果及び考察

##### 3.1 組織観察

レーザー走査によるビード組織を図 1 に示す. 0 °面は積層するビードが観察され, 90 °面ではレーザーの走査跡が観察された. 特に 0 °面ではビード界面を貫くエピタキシャル成長が見られ, 90 °面ではレーザー

の走査跡が観察され、これらのなす角は約67°となっていた。図2はas-built材のIPFマップであるが、0°面では積層方向に沿う柱状晶が見られたことから、これはエピタキシャル成長の影響が考えられる。90°面では混粒組織となっていた。as-built材のTEM像(図3)を見ると、0°面では高転位密度となっており、コラム状組織を有していた。90°面では微細なNb化合物である $\delta$ 相が基盤の目状に析出していた。また、STA

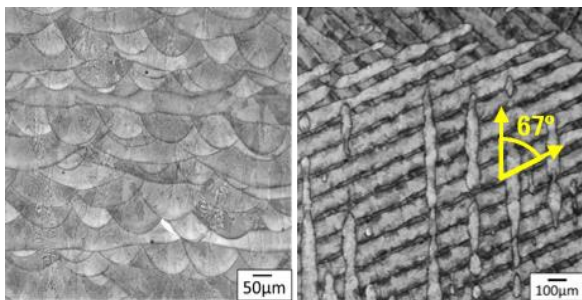


Fig. 1. OM images of as-built samples on: (a) vertical and (b) horizontal planes.

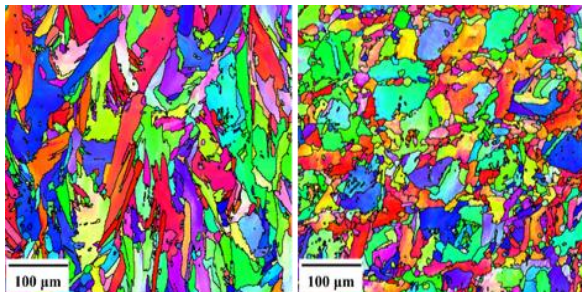


Fig. 2. IPF maps of as-built samples on: (a) vertical and (b) horizontal planes.

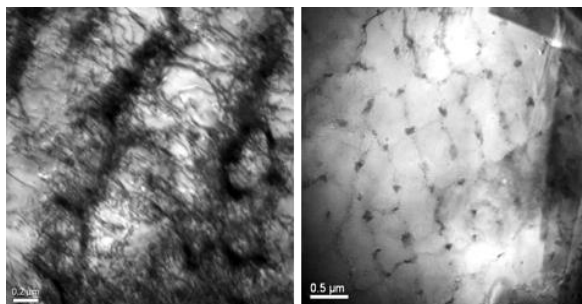


Fig. 3. TEM images of as-built samples on: (a) vertical and (b) horizontal planes.

材, DA 材共に強化相である  $\gamma'$ - $\gamma''$ 相が析出していた。

### 3.2 引張試験

室温において、as-built材, STA 材, DA 材いずれの試料も 0°/90°材において異方性は見られなかった。しかし、共通する結果として、延性は0°材が、強度は90°材がわずかに高い値を示した。図4に示すように、STA 材及びDA 材の強度、延性は、IN 718 溶解鍛造(C&W)材の規格値<sup>(3)</sup>を上回ることが明らかとなった。

しかし 650 °C では、0.2%耐力及び引張強度は溶解鍛造材よりも高くなっていったが、

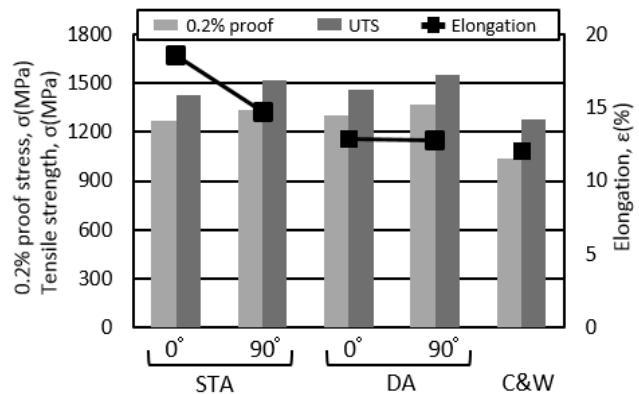


Fig. 4. Tensile properties at room temperature of heat treated (STA and DA) specimens compared with Cast and Wrought specimen.

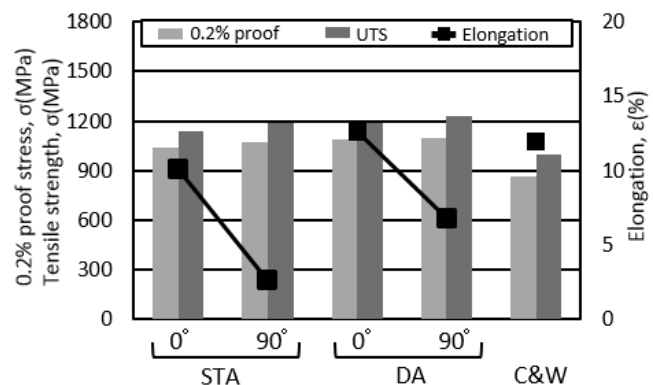


Fig. 5. Tensile properties at 650°C of heat treated(STA and DA) specimens compared with Cast and Wrought specimen.

延性はそれと同等もしくは低い結果になった。特に 90°材での延性低下が顕著に見られ、延性の異方性が観察された。一方向凝固 Ni 基超合金は、高温において異凝固方向に垂直な粒界に沿う破壊<sup>(4)</sup>により、延性が低下することが知られている。積層造形材は図 2 からわかるように柱状晶粒の集合体とみなすことができ、90°材は応力方向に垂直な粗大結晶粒界にそった破壊、特にデンドライト界面にそった破壊が観察されたことから、粒界熱間割れ (intergranular hot cracks)<sup>(5),(6)</sup>が関係していると考えられる。

### 3.3 クリープ試験

図 6 に示すように、熱処理の有無にかかわらず積層造形材のクリープ延性及び破断寿命は溶解鍛造材よりも著しく低いことが分かった。なお、いずれの材料も 0°材を使用している。溶体化処理と時効処理を施した STA 材は as-built 材よりも破断寿命が短くなっていたが、溶体化処理をせず直接時効処理を施した DA 材は as-built 材よりもクリープ延性及び破断寿命が長いことが分かった。このことから、積層造形材に対して、従来の熱処理が必ずしも最適でないことが明らかになった。

図 7 は DA 材の 0°および 90°材のクリープ曲線であり、90°材のクリープ延性及び破断寿命は 0°材に比べ大幅に低く、顕著な異方性が観察された。

DA 0°材の破面側面を SEM で観察したところ、図 8 に示すようにビード界面に沿ってき裂が進展している様子が見られた。また、破面上面(図 9)を見ると、デンドライト界面でのき裂が多く観察された。クリープ延性低下の要因の一つとして、ビード界面、特にデンドライト界面でのき裂

(intergranular hot cracks)<sup>(5),(6)</sup>が関係していると考えられる。

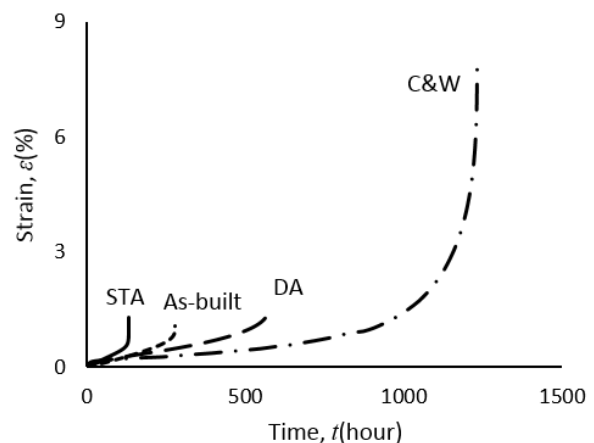


Fig. 6. Creep rupture curves(650°C, 550MPa) of additive manufactured vertical specimens including heat treated ones compared with Cast and Wrought specimen.

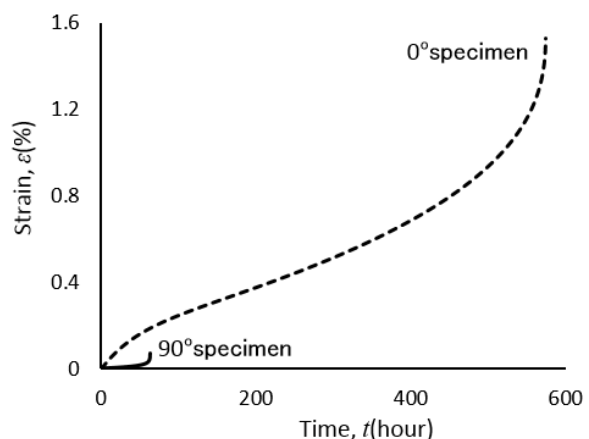


Fig. 7. Creep rupture curves at (650°C and 550MPa) of the direct aged specimens.

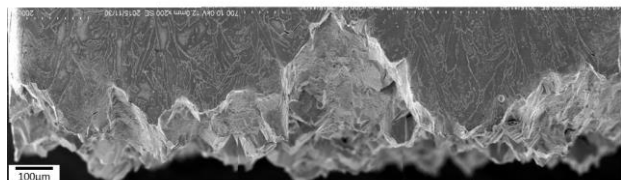


Fig. 8. Side surface image of direct aged vertical specimen after creep rupture test.

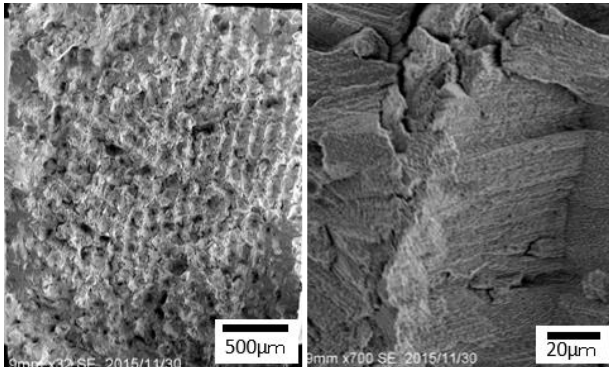


Fig. 9. Fracture surface image of direct aged vertical specimen after creep rupture test.

#### 4. 結言

積層造形した IN718 に対して、熱処理を施し、組織観察および強度試験として引張り試験、クリープ試験を行った。

1. STA 材及び DA 材の強度は、溶解鍛造材の規格値を上回った。650 °C の引張り試験では、90° 材の延性が低いことが分かった。高温での破壊は柱状結晶の粒界による破壊が支配的と考えられる。
2. 650 °C、550MPa のクリープ試験では、積層造形材のクリープ延性及び破断寿命は、熱処理の有無にかかわらず、溶解鍛造材よりも著しく低かった。また、顕著な異方性がみられた。クリープ試験の延性低下は、デンドライト界面のき裂発生・進展によるものと考えられる。

#### 5. 参考文献

- (1) D. F. Paulonis and J. J. Schirra: Superalloys 718, 625, 710 and various Derivatives (2001), pp. 13-37.
- (2) Fencheng Liu et al, Microstructure and residual stress of laser rapid formed Inconel 718 nickel-base superalloy Optics and Laser Tech.

43 (2011) pp.208-213

- (3) [http://www.dsml.co.jp/pdf/Inconel718\\_1007.pdf](http://www.dsml.co.jp/pdf/Inconel718_1007.pdf)
- (4) D.C.Pradhan, K.K.Sharma and S.N.Tewari, Mechanical property anisotropy in superalloy EI-929 directionally solidified by an exothermic technique (1986), pp.2871-2875.
- (5) R. G. Thompson, B. Radhakrishnan, and D. E. Mayo, Superalloy 718-Metallurgy and Applications, ed. by E.A. Loria TMS (1989), pp. 437-445
- (6) X. Zhao, X. Lin, J. Chen, L. Xue, W. Huang, Materials Science and Engineering: A, vol. 504, 25(2009), pp.129–134.