

3D プリントを用いた核融合炉ダイバータ用 タングステン系材料の開発

デジタルものづくり課 山本貴文

1. 緒言

タングステン(W)は、高融点、高密度、高い熱伝導、低い熱膨張率、高温域における高い強度等、他の金属には無い優れた材料特性を有している金属である。これらの特徴から、W 材料は医療機器のエクソ線コリメータ、電子線発生用のフィラメント、単結晶用の溶解るつぼ等、特殊な用途で工業的に利用されている。最近では、核融合炉のプラズマ対向(ダイバータ)材料の素材候補としても有力視されている。これは、W が有する上記の特性に加えて、低トリチウム蓄積特性と耐スパッタリング性が、核融合炉のプラズマ/中性子照射環境下で優位に作用するためである。本研究では、W 材料の新たな加工技術として、レーザ積層造形(Additive Manufacturing, AM)の適用を検討した¹⁾。これまでの実験で、造形体中のクラックを抑制するために、固溶効果の発現が予想されるレニウム(Re)の添加を試みたところ、W-Re 混合粉末を用いて高密度(相対密度 98%以上)な造形体を得るための製造条件を確立した。本稿では、レーザ積層造形により作製した W-Re 造形体の化学組成、相同定を評価した結果とともに、クラックの伝播挙動を評価した結果を記す。

2. W-Re 造形体の化学組成、相同定

W-1%Re, W-3%Re, W-10%Re (mass%)の3種の混合粉末から作製した各 W-Re 造形体に含有される Re 濃度を、ICP-AES により定量した。その結果、造形体中の Re 濃度は、0.9%(W-1%Re)、2.7%(W-3%Re)、10.4%(W-10%Re)と評価され、混合粉末中の Re 濃度と極めて良く一致した。したがって、混合粉末から目標の Re 濃度を有する造形体を精度よく製造可能であることが判明した。造形後に形成された相の相同定には、X 線回折装置(XRD)を用いた。混合粉末の XRD プロファイルでは W と Re に帰属可能な回折ピークが認められたが、造形後は Re の回折ピークは消滅し、単相 W の回折ピークのみが認められた。この変化は、レーザ加熱により Re 粉末が W 粉末とともに溶解され、凝固後に単相の W-Re 固溶体が形成されたことを示唆している。加えて、単相 W の回折ピーク以外は認められないことから、冷却過程で金属間化合物を形成することなく凝固したと推察できる。以上より、高密度化を達成するレーザ照射条件下において、目標とした Re 濃度を含む W-Re 固溶体が形成されていることが確認できた。

3. クラックの伝播挙動

図1に、純 W と W-10%Re の断面試料から取得した反射電子(BSE)像を示す。断面試料の調整には、試料調整時に生じるクラックを考慮して、アルゴンビームイオンミリング法を用いた。純 W と W-10%Re とともに、断面中には積層方向に伸長したクラックの形成が認められた。しかし、Re を 10%添加した場合、クラックの開口幅が減少するとともに、進展距離も短くなる傾向が見受けられ、Re 添加に伴うクラック抑制効果の発現を示唆する結果が得られた。このクラック抑制効果を定量化するために、画像処理ソフトウェアを用いて、クラック密度(観察面積当たりのクラック長さ)を計測した。その結果、純 W と W-10%Re のクラック密度は、それぞれ $25,924 \text{ m}^{-1}$ と $16,463 \text{ m}^{-1}$ と評価され、10%の Re 添加は純 W のクラック密度を 36.5%も低減させる効果があることが判明した。今後、金属学的な材料解析から、クラック抑制因子の特定とさらなるクラック抑制に向けた材料設計の指針を検討する予定である。

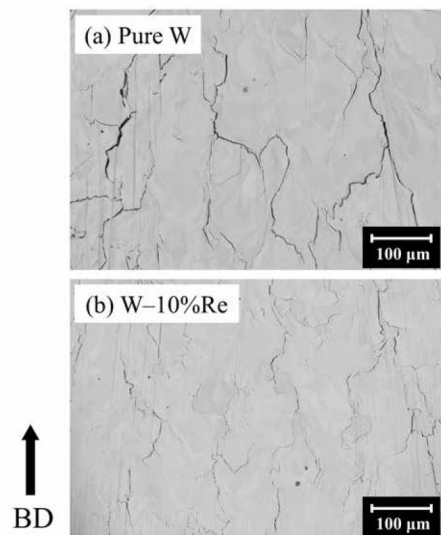


図1 純WとW-10%Reの断面試料から取得したBSE像

参考文献

- 1) T. Yamamoto, M. Hara, Y. Hatano, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials 95 (2021) 105410

謝辞 本研究は科研費(若手研究:20K14451)の助成を受けたものである。