

氏 名	高 丈明
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	博 1 1 9 1 号
学位授与の日付	令和 7 年 3 月 21 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研 究 科 ・ 専 攻	工芸科学研究科 設計工学専攻
学 位 論 文 題 目	レーザ粉末床溶融結合法により作製した金型鋼材の組織形成 と機能性向上に関する研究
審 査 委 員	(主査)教授 森田 辰郎 教授 高木 知弘 准教授 武末 翔吾

論文内容の要旨

本研究では、レーザ粉末溶融結合法 (LPBF 法) を用いて金型用鋼材として多用されるマルテンサイト系ステンレス鋼 SUS420J2 (SUS420J2 鋼) を造形する際のスキャンストラテジが組織形成に及ぼす影響を明らかにするとともに、その機能性向上を図ることを目的とした。本論文は全 7 章から構成されている。各章の要旨を以下に示す。

第 1 章 緒論

本章では、研究の背景と目的を説明した。

第 2 章 レーザ走査パターンと微視組織および残留応力分布の関係

LPBF 法で造形した SUS420J2 鋼は、造形ままでその組織形態が焼入れ・焼戻しを施した展伸材と同様の組織形態となったが、走査パターンによる顕著な相違は認められなかった。一方で、レーザ走査による溶融と収縮が走査領域全域で起こるため、走査領域を小区画化することが残留応力低減に効果的であることを明らかにした。走査領域を小区画化し層毎に走査方向を変えて走査パターン位置もシフトさせたパターンが最も残留応力値が低く、全層同じ走査方向で走査領域を一様に走査したパターンと比較して応力値は 75%低下した。

第 3 章 LPBF 法により造形した SUS420J2 鋼の造形後熱処理に関する検討

積層時の下方へ加えられる熱影響が焼戻しと同様の効果をもたらすため、造形後に焼入れ無しに焼戻しのみを施しても組織形態や諸特性にほとんど変化は認められなかった。一方で、造形後に相変態を伴う焼入れ・焼戻しを施すと、残留オーステナイト (γ) 相がほとんど消失し、残留応力は相変態による応力の解放と再配分によって応力の方向依存性が緩和されるとともにその値が低下した。このことは、LPBF 法で造形した SUS420J2 鋼には造形後に焼入れ・焼戻しを施すことが良いことを示していた。機械的性質は、造形後に焼入れ・焼戻しを施すことで同処理を施した展伸材と同等以上の静的強度となったが、内在する造形欠陥によって疲労強度は大幅に減じられた。その一方で、熱処理による硬さの値に変化がなかったことから、LPBF 法で造形した SUS420J2 鋼は造形ままで焼入れ・焼戻しを施した展伸材と同等の耐摩耗性を有することが実験的に明らかとなった。

第4章 微視組織に及ぼす繰り返しレーザ走査の影響

LPBF 法では、1 層あたりレーザを 2 回照射することで未溶融部の溶融と残存ガスの排出が促進されるため、空隙率が改善されることが明らかとなった。1 回目の照射で溶融が十分に進んだ場合には、2 回目は過度な溶融を避けるために低レーザ出力で照射する方が空隙率は低くなる。残留応力においては、空隙率が低いと残留応力値は顕著に高くなる。そして、レーザの走査方向が全層同じ場合、1 層あたりレーザを 2 回照射することで応力の解放と再配分によって応力の方向依存性は緩和されるが、再溶融による凝固ひずみ加わるため応力値は若干増加する。微視組織は、レーザ出力あるいは 1 層あたりの照射回数に関わらず凝固時の冷却速度が十分に速いため、組織形態に顕著な相違は認められなかった。その一方で、積層時の下方へ向けた熱影響が焼戻しと同様の効果をもたらすため、残留 γ 相の体積分率には位置依存が認められ、最終造形面を含む上部では残留 γ 相の体積分率が低かった。このような組織形態が反映され、上部は高硬さを示した。このことは、LPBF 法を用いて SUS420J2 鋼を造形する場合、部品形状や位置に依存して残留オーステナイト相が一定量残存することを示唆していた。

第5章 走査領域の小区画化による残留応力および造形欠陥に及ぼす影響

レーザ走査に伴う溶融と収縮が走査領域全域で起こるため、走査領域を小区画化して造形する場合には小区画の大きさが小さいほど生じる応力も小さくなる。そして、小区画内の応力値の変動幅が縮小されるとともに応力の方向依存性も緩和される。その一方で、小区画の境界部がレーザ走査の折り返し位置となるため、過度な溶融によってキーホールが生じ易く、小区画の大きさが小さいほど欠陥数が増加し空隙率は高くなる。上記結果は、残留応力の低減と造形欠陥の低減においては、個別にレーザ照射条件の最適化が必要であることを示唆していた。

第6章 LPBF 法により造形した SUS420J2 鋼の疲労特性改善に関する検討

LPBF 法では、高レーザ出力になるほど溶融が進む一方、過度な溶融によって欠陥の大きさが増大する。しかし、1 層あたりレーザを 2 回照射することで溶融が進むため、レーザ出力に依らず空隙率は低下する傾向を示した。残留応力においては、レーザ出力の上昇に伴う熱影響の範囲が広がることで凝固時の冷却速度が変わる。そのため、レーザ出力あるいは 1 層あたりのレーザ照射回数と残留応力値との間に明瞭な相関関係は認められなかった。上記結果は、第 5 章と同様、造形欠陥の低減と残留応力の低減には、個別にレーザ照射条件の最適化が必要であることを示唆していた。そして、1 層あたりレーザを 2 回照射し造形欠陥の大きさを縮小することで疲労強度が改善されることを実験的に明らかにした。本研究の結果では、1 層あたりレーザを 2 回照射し欠陥の大きさが 100 μm から 40 μm 程度まで縮小したことで疲労強度は 20%向上した。

第7章 結論

本章では、研究で得られた知見を総括した。

論文審査の結果の要旨

LPBF 法は、複雑精緻な部品を金型無しに CAD データから直接造形できる優れた加工技術である。一方で、局所的な溶融と凝固によって生じる応力を低減させることが工業的に大きな課題

であり、また、レーザ走査に伴う熱影響を考慮した造形後熱処理に関する詳細な調査も必要となっている。本論文の目的は、SUS420J2 鋼を造形する際のスキャンストラテジが組織形成に及ぼす影響を明らかにするとともにその機能性向上を図るという工業的意義の大きい研究である。

第 2 章では、走査パターンによって組織形態に顕著な相違はなくとも、走査パターンの工夫が残留応力低減に有用であることを実験的に明らかにした。また、第 3 章では、造形後に相変態を伴う焼入れ・焼戻しを施すことが実用に供する上では重要であることを明確にする一方で、耐摩耗性においては造形後熱処理が必要では無いことを明らかにした。第 4 章では、1 層あたりレーザを 2 回照射することが造形欠陥の低減に対して効果的であることを示した。そして、第 5 章では、走査領域の小区画化による造形欠陥および残留応力への影響を明らかにし、さらに第 6 章では繰り返しレーザ走査によって欠陥の大きさが縮小されたことで疲労強度が改善することを実験的に明らかにした。これらの成果は、学術的な知見として有用なだけでなく、LPBF 法を工業的に活用する上での重要な知見となり、学術的・工学的貢献において高く評価されるものである。

以下に本学位論文の基礎となった 3 編の論文を示す。いずれもレフェリーシステムのある学術論文に筆頭著者として掲載されるものである。

[1] 高丈明, 田窪亮介, 武末翔吾, 森田辰郎, レーザ粉末床熔融結合法で造形したマルテンサイト系ステンレス鋼 SUS420J2 におけるレーザ走査パターンと微視組織および残留応力分布の関係, 材料, 73 (9) 743-750 (2024).

[1]の英訳再投稿: Takeaki Taka, Ryosuke Takubo, Shogo Takesue, Tatsuro Morita, Relationship of Scan Strategy on Microstructure and Residual Stress of Martensitic Stainless Steel SUS420J2 Fabricated by Laser Powder Bed Fusion, Materials Transactions, in press.

[2] 高丈明, 田窪亮介, 武末翔吾, 森田辰郎, LPBF 法により造形したマルテンサイト系ステンレス鋼 SUS420J2 の熱処理による特性改善, 材料, 74 (4) 259-266 (2025).

[3] 高丈明, 田窪亮介, 武末翔吾, 森田辰郎, LPBF 法により造形したマルテンサイト系ステンレス鋼 SUS420J2 の微視組織に及ぼす繰り返しレーザ走査の影響, 材料, 印刷中.

参考 (国際会議における発表): Takeaki Taka, Ryosuke Takubo, Shogo Takesue, Tatsuro Morita, Relationship of Scan Strategy on Microstructure and Residual Stress of Martensitic Stainless Steel SUS420J2 Fabricated by Laser Powder Bed Fusion, Asia-Pacific Conference on Fracture and Strength 2024 (APCFS2024).