



Title	Thermal-Mechanical Analysis and Experimental Measurement of Residual Stresses in Wire-Arc Additive Manufactured Typical Parts
Author(s)	Huang, Wenjia
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/98790
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏名 (HUANG WENJIA)	
論文題名	Thermal-Mechanical Analysis and Experimental Measurement of Residual Stresses in Wire-Arc Additive Manufactured Typical Parts (ワイヤーアーク積層造形材における残留応力の熱構造連成解析と実験測定)
Abstract of Thesis	
<p>Wire-arc additive manufacturing (WAAM) has much higher productivity for large-size parts compared to additive manufacturing (AM) processes using heat sources such as lasers and electron beams. However, WAAM can result in significant residual stress and deformation, potentially affecting the strength of the components. Therefore, controlling and reducing residual stress in WAAMed components is an important research subject. Currently, studies have primarily relied on experimental approaches, with insufficient use of numerical simulations for residual stress. The purpose of this dissertation was to clarify the residual stress generation mechanism and distribution characteristics in WAAM by combining experimental measurement and thermo-elastic-plastic finite element analysis, with a particular focus on the compressive residual stress induced by LTT (low transformation temperature) welding wire used for WAAM parts.</p> <p>Chapter 1 provided a brief overview of the current status of WAAM. Additionally, the research on the application of LTT material in WAAM was introduced, demonstrating the potential of applying LTT to improve the mechanical properties of WAAM.</p> <p>Chapter 2 introduced the principle of two residual stress measurement methods and basic equations of thermo-elastoplastic finite element analysis (FEA) for WAAM. Additionally, a basic model for numerically analyzing transient heat conduction phenomena and residual stress in WAAM using the research software JWRIAN was also constructed, and the influence of element size was investigated.</p> <p>In Chapter 3, stainless steel welding wire SUS308LSi and a plate of stainless-steel SUS304 as the substrate were used to build wall and pipe WAAM parts. A thermomechanical coupling simulation model with an equivalently parallelized dual heat source was developed to reproduce both the temperature field and residual stress field, and its accuracy is validated by comparison with the measurement. Furthermore, the formation mechanism of the WAAM residual stress was elucidated and the correlation with the deposition height was quantitatively analyzed.</p> <p>In Chapter 4, the research focuses on pipe parts primarily used for storage and transportation, applying 10Cr10Ni LTT welding wire in WAAM. A thermo-elastoplastic finite element model for WAAM using LTT welding wire was developed to predict thermal stress changes, residual stress, and residual deformation during deposition. The predicted results were consistent with measured values, verifying the accuracy of the numerical analysis model. The distribution characteristics of residual stress and its evolution with increasing deposition layers in LTT WAAM parts were also clarified.</p> <p>In Chapter 5, the large-area surface cladding specimens were fabricated using newly developed 16Cr8Ni LTT welding wire under different WAAM conditions. A thermo-elastoplastic finite element model was built to predict the residual stress due to LTT surface cladding, confirming the generation of compressive residual stress under various WAAM conditions. Additionally, residual stress distribution was measured using both the contour method and XRD method, verifying the accuracy of the numerical analysis.</p> <p>In Chapter 6, the main conclusions were summarized and extended research issues were presented.</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏名 (HUANG WENJIA)	
	(職)
論文審査担当者	主査 教授 麻寧緒
	副査 教授 大沢直樹
	副査 教授 飯島一博
	副査 准教授 辰巳晃

論文審査の結果の要旨

ワイヤーアーク積層造形 (WAAM) は、レーザや電子ビームなどの熱源を用いる積層造形プロセスと比較して、生産性が高く、大型部品の積層造形に適している。しかし、WAAMによる残留応力や変形は大きくなる可能性があり、部品強度にも影響を与える。そのため、WAAM残留応力を制御・低減する基礎研究は必要不可欠である。これまでの研究では主に実験データに基づいており、数値シミュレーションを用いた残留応力の解析が不足している。本論文の目的は、実験測定と熱弾塑性有限要素解析を組み合わせて、WAAMにおける残留応力の生成メカニズムと分布特性を明らかにすることである。特に、新たに開発した低変態温度 (LTT) 溶接ワイヤを用いたWAAM部品に圧縮残留応力が生成される可能性について焦点を当てている。

第1章では、WAAMの現状とLTT材料の応用に関する研究をレビューし、LTT溶接ワイヤを用いるWAAM部品に圧縮残留応力が生成される可能性を分析している。

第2章では、WAAM残留応力に関する実験測定法の原理と熱弾塑性有限要素解析の基本方程式を整理している。さらに研究用ソフトウェアJWRIANを用いてWAAMにおける過渡熱伝導および過渡応力・残留応力を解析する基本モデルを構築し、要素サイズの影響を調査している。

第3章では、ステンレス鋼SUS308LSiとSUS304をそれぞれ溶接ワイヤと基板として、WAAMにより壁部品とパイプ部品を製作している。二つ並列の等価熱源を導入した熱構造連成シミュレーションモデルを開発し、温度場と残留応力場を予測している。高精度な予測を測定値との比較によって検証している。さらにWAAM残留応力の形成メカニズムを解明し、残留応力分布と積層高さの関係を定量的に評価している。

第4章では、貯蔵や輸送に主に使用されるパイプ部品を対象とし、10Cr10Ni系LTT溶接ワイヤをWAAMに適用している。まず、積層パイプ部品の残留応力と変形をそれぞれ測定している。次に、LTT溶接ワイヤを用いたWAAM熱弾塑性有限要素モデルを開発し、積層中の熱応力変化と残留応力ならびに残留変形を予測している。予測結果は測定値とよく一致しており、数値解析モデルの妥当性がしめされている。さらにLTTを用いたWAAMによる残留応力の分布特性と、積層層数の増加に伴う変化を明らかにしている。

第5章では、16Cr8Ni系LTT溶接ワイヤを用いる広領域の表面肉盛試験体を、異なるWAAM条件で製作している。さらにLTT表面肉盛による残留応力を予測する熱弾塑性有限要素解析モデルを開発し、それぞれのWAAM条件で生成した圧縮残留応力を解析している。加えて、残留応力をコンター法とXRD法でそれぞれ測定し、数値解析の精度も検証している。

第6章では、主な結論をまとめ、今後の研究課題を提示している。

以上のように、本論文は、ステンレスSUS308LiとLTT溶接ワイヤをそれぞれ用いてワイヤーアーク積層造形による壁部品とパイプ部品および表面肉盛試験体の残留応力を予測する数値解析モデルを開発している。特に、積層高さ方向における残留応力の分布特徴やLTT溶接ワイヤによる圧縮残留応力の生成メカニズムを明らかにしている。得られた知見は、積層造形技術を各種構造体に適用する場合の残留応力の制御に非常に有益である。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。