ETH zürich

ETH Library

Laser Powder Bed Fusion of thin-walled Steel and Nickel Parts

Effect of Part Size on Microstructure, Processing Defects and Mechanical Properties

Doctoral Thesis

Author(s):
Wróbel, Rafał

Publication date:
2023

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-b-000642494

Rights / license:
In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

This page was generated automatically upon download from the ETH Zurich Research Collection.
For more information, please consult the Terms of use.

DISS. ETH NO. 29395

Laser Powder Bed Fusion of thin-walled Steel and Nickel Parts:
Effect of Part Size on Microstructure, Processing Defects and Mechanical Properties

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Rafał Wróbel

MSc in Materials Engineering, AGH University of Science and Technology - Kraków

born on *28.09.1994*

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Ralph Spolenak, examiner

MER Dr. Christian Leinenbach, co-examiner

Prof. Dr. Jörg Löffler, co-examiner

Prof. Dr. Johan Moverare, co-examiner

2023

Abstract

Laser powder bed fusion (L-PBF) is one of the additive manufacturing (AM) technologies that offers a new approach to the fabrication of complex geometries. It enables the fabrication of lattice structure-based geometries and very thin-walled structures that cannot be manufactured by other technologies such as casting or subtractive manufacturing. These geometries play an essential role in various applications, such as aerospace, where lattice-based geometry contributes to reducing the weight of the final part. A thin-walled structure finds its application in parts exposed to elevated temperatures and where heat exchange to cool down the part is important. In the medical sector, implants, including lattices, improve osseointegration. Furthermore, a constantly growing variety of suitable materials for L-PBF in combination with process tuning allows for a better design with respect to its functionality. Therefore, this technology has received more and more attention in recent time. Despite all the advantages that this technology brings, the question remains whether we can apply the once-optimised parameters on simple geometries to more complex geometries, of which the ability to produce using this technology is the greatest asset. When considering the above applications, feature sizes are very often within only a few hundreds of micrometer. Therefore, factors such as local heat flow and the resulting thermal history will differ significantly between larger and smaller samples. This, in turn, will affect the formation of melt pools and, as a result, changes in microstructure and the formation of defects such as lack of fusion or keyhole porosity.

In the first part of this thesis, a set of thin walls consisting of 1 to 8 tracks were fabricated using a solid-solution strengthened nickel alloy Hastelloy X using L-PBF. The as-built samples showed no evidence of defects, such as cracks, porosity or lack of fusion. Thermal history investigations, including thermocouple tests and thermal simulations confirmed a lack of global preheating while fabricating a thin-walled structures. Nevertheless, a preheating on a very local scalewas observed and was increasing with the number of scanned tracks. It resulted in the formation of deeper melt pools on the central part of the walls consisting of multiple tracks. The thinnest sample, consisting of one single track, displayed a more complex cellular sub-grain structure compared to the thicker walls, which consisted of two regions of very fine and coarser solidification cells within one melt pool. Moreover, the thinnest samples were characterized by very fine grains oriented towards

the centerline of the wall, while in the thicker samples, a giant grains of hundreds of micrometers were growing parallel to the build direction. In the vicinity of the edges, a very fine grains were found with a random orientation what was attributed to the nucleation on the partially sintered powder particles to the walls.

A similar study to the one described above was carried out using 316L stainless steel, but with more emphasis on the formation of melt pools in samples with different thicknesses and their effect on microstructure formation. In addition, the study was extended to mechanical tests and post-fracture microstructure studies of thin-walled specimens. All the samples showed a fully dense structure with no evidence of any defects. The size and geometry of the melt pools varied significantly between different wall thicknesses, due to a local preheating and a denudation process. The solidification cells size was observed to decrease with an increase of the wall thickness. In the thinnest samples, solidification cells were growing almost parallel to the build direction, whereas for the thicker samples, side branching and slender columnar grains were observed in the centerlines of the melt pools. Moreover, a pronounced <100> texture with respect to the build direction was present in the single and double tracks samples, whereas dominant orientation in the thicker samples was <101>. Concerning the mechanical properties, thicker samples showed a higher yield strength and ultimate tensile strength, which was attributed to finer solidification cells. Moreover, the ductility of the thicker samples were significantly higher compared to the thinner samples, what was explained by the formation of deformation twins and better surface quality of the samples.

Taking into account the knowledge gained from the studies of the effect of wall thickness on microstructure formation and mechanical properties, a new scanning strategy was developed. The main focus was on the development of a scanning strategy that allows a more uniform powder denudation, regardless of the number of paths, and the minimization of local preheating. With this scanning strategy, it was possible to obtain a samples consisting of a fine-grained microstructure in the as-built state. However, despite the optimum parameters used, the sample was characterized by the formation of deep keyhole melt pool morphologies and the formation of keyhole porosity, indicating that further process optimization is required.

As demonstrated with thin-wall studies and the new scanning strategy, transferring the once-optimized parameters between different sample geometries and different scanning strategies can be challenging. This leads to differences in microstructure and the formation of defects. This highlights the need to develop a universal process monitoring system with an algorithm capable of detecting these differences. Most of the current research is based on semi-supervised or supervised learning, which requires the collection and labeling of very large data sets, which can be costly and time-consuming. The present study

demonstrates the feasibility of using unsupervised machine learning to monitor the formation of melt pool scale differences, which has further implications for microstructure formation, as well as the formation of defects such as keyhole porosity. A combination of kernel Bayes rule for inference and Bayesian adaptive resonance for structuring of airborne acoustic emission with L-PBF has been shown to be able to recognize conductive, stable and unstable keyhole regimes. Moreover, the self-learning capability of the developed framework exceeds 88% accuracy.

Keywords

Additive Manufacturing, Laser-Powder Bed Fusion, Ni-base superalloys, 316L stainless steel, thin-walled structures, process monitoring

Zusammenfassung

Das Laser-Pulver-Bett-Fusion-Verfahren (englisch: Laser Powder Bed Fusion, L-PBF) gehört zu den Technologien der additiven Fertigung (AM), die einen neuen Ansatz für die Herstellung komplexer Geometrien bieten. Sie ermöglicht die Herstellung von filigranen und komplex-geometrischen Gittern und sehr dünnwandigen Strukturen, die mit anderen Technologien wie Gießen oder subtraktiver Fertigung nicht hergestellt werden können. Diese Geometrien spielen in verschiedenen Anwendungen eine wesentliche Rolle, z. B. in der Luftfahrt, wo Gitter dazu beiträgt, das Gewicht des fertigen Teils zu verringern. Dünnwandige Strukturen findet Anwendungen bei Teilen, die hohen Temperaturen ausgesetzt sind und bei denen der Wärmeaustausch zur Abkühlung des Teils wichtig ist. Im medizinischen Bereich verbessern Implantate, einschließlich Gittern, die Osseointegration. Darüber hinaus ermöglicht eine ständig wachsende Vielfalt geeigneter Werkstoffe für L-PBF in Verbindung mit einer Prozessabstimmung ein besseres Design im Hinblick auf die Funktionalität. Aus diesen Gründen hat diese Technologie in letzter Zeit immer mehr Aufmerksamkeit erhalten. Trotz aller Vorteile, die diese Technologie mit sich bringt, bleibt die Frage, ob wir die einmal für einfache Geometrien optimierten Parameter auf komplexere Geometrien mit Strukturen im Bereich von einigen hundert Mikrometern übertragen können. Für die Entstehung der Mikrostrukturen wesentlich Faktoren wie die Wärmeausbreitung im Bauteil unterscheiden sich erheblich zwischen größeren und kleineren Proben. Dies wiederum wirkt sich auf die Bildung von Schmelzbädern und infolgedessen auf Veränderungen der Mikrostruktur und die Bildung von Defekten wie mangelndes Schmelzen oder Keyhole-Porosität aus.

Im ersten Teil dieser Arbeit wurde eine Serie von dünnwandigen Proben, bestehend aus 1 bis 8 Bahnen, einer mischkristallverfestigten Nickellegierung Hastelloy X mittels L-PBF hergestellt. Die fertige Probe wies keine Anzeichen von Defekten wie Rissen, Porosität oder mangelnder Verschmelzung auf. Untersuchungen des thermischen Verlaufs, einschließlich Messungen mit Thermoelemente und thermischer Simulationen, ergaben, dass bei der Herstellung dünnwandiger Strukturen keine globale Vorerwärmung stattfand. Dennoch wurde eine sehr lokale Wärmeakkumulation festgestellt, die mit der Anzahl der gescannten Spuren zunahm. Dies führte zur Bildung von tieferen Schmelzbädern im zentralen Teil der Wände, die aus mehreren Spuren bestehen. Die dünnste Probe, die

aus einer einzigen Spur bestand, wies im Vergleich zu den dickeren Wänden eine komplexere zelluläre Subkornstruktur auf, die aus zwei Regionen mit sehr feinen und gröberen Erstarrungszellen innerhalb eines Schmelzbades bestand. Darüber hinaus waren die dünnsten Proben durch sehr feine, auf die Mittellinie der Wand ausgerichtete Körner gekennzeichnet, während in den dickeren Proben riesige Körner von Hunderten von Mikrometern parallel zur Baurichtung wuchsen. In der Nähe der Kanten wurden sehr feine Körner mit einer zufälligen Ausrichtung gefunden, was auf die Keimbildung an den teilweise gesinterten Pulverteilchen an den Wänden zurückgeführt wurde.

Eine ähnliche Studie wie die oben beschriebene wurde mit rostfreiem Stahl 316L durchgeführt. Der Schwerpunkt lag jedoch mehr auf der Bildung von Schmelzbädern bei unterschiedlichen Probendicken und deren Auswirkungen auf die Mikrostrukturbildung. Darüber hinaus wurde die Studie auf mechanische Prüfungen und Untersuchungen der Mikrostruktur nach dem Bruch ausgedehnt. Alle Proben wiesen keine Anzeichen von Defekten auf. Die Größe und Geometrie der Schmelzbäder variierte erheblich zwischen den verschiedenen Wandstärken, was auf eine lokale Vorerwärmung und einen Denudationsprozess zurückzuführen ist. Es wurde beobachtet, dass die Größe der Erstarrungszellen mit zunehmender Wanddicke abnimmt. Bei den dünnsten Proben wuchsen die Erstarrungszellen fast parallel zur Baurichtung, während bei den dickeren Proben seitliche Verzweigungen und schlanke säulenförmige Körner in den Mittellinien der Schmelzbäder beobachtet wurden. Darüber hinaus war bei den 1- und 2-spurigen Proben eine ausgeprägte Textur <100> in Bezug auf die Baurichtung vorhanden, während bei den dickeren Proben die Orientierung <101> dominierte. Bei den mechanischen Tests wiesen die dickeren Proben eine höhere Streckgrenze und Zugfestigkeit auf, was auf die feineren Erstarrungszellen der dickeren Proben zurückzuführen war. Darüber hinaus wurde die Duktilität der dickeren Proben im Vergleich zu den dünneren Proben erhöht, was durch Zwillingsbildung und die bessere Oberflächenqualität der Proben erklärt wurde.

Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus Studien über die Auswirkung der Wanddicke auf die Mikrostrukturbildung und die mechanischen Eigenschaften wurde eine neue Laserscan-Strategie entwickelt, die unabhängig von der Anzahl der Pfade einen gleichmäßigen Denudationsprozess ermöglicht und die lokale Vorerwärmung minimiert. Damit war es möglich, ein aus feinen Körnern bestehendes Gefüge herzustellen. Trotz der optimalen Parameter war die Probe durch die Bildung von sehr tiefen Keyhole-Schmelzbadmorphologien und die Bildung von Keyhole-Porosität gekennzeichnet.

Wie bei der Untersuchung der dünnwandigen Strukturen und der neuen Scanning-Strategie gezeigt wurde, kann die Übertragung einmal optimierter Parameter zwischen verschiedenen Probengeometrien und unterschiedlichen Scanning-Strategien eine grosse

Herausforderung darstellen. Dies führt zu Unterschieden im Mikrogefüge und der Ausbildung von Defekten. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, ein universelles Prozessüberwachungssystem mit einem Algorithmus zu entwickeln, der diese Unterschiede erkennen kann. Die meisten aktuellen Forschungsarbeiten basieren auf teilüberwachtem oder überwachtem maschinellem Lernen, was die Sammlung und Aufbereitung sehr großer Datensätze erfordert. Dies ist kostspielig und zeitaufwändig. Die vorliegende Arbeit demonstriert die Machbarkeit des Einsatzes von unüberwachtem maschinellem Lernen zur Überwachung der Bildung von Schmälzbädern, die weitere Auswirkungen auf die Mikrostrukturbildung sowie die Bildung von Defekten wie z.B. Keyhole-Porosität haben. Es hat sich gezeigt, dass eine Kombination aus der Kernel-Bayes-Regel für die Inferenz und Bayes'scher adaptiver Resonanz für die Strukturierung von Luftschallemissionen mit L-PBF verwendet werden kann, um die Verarbeitung im stabilen und instabile Keyhole.Modus zu erkennen und zu unterscheiden. Darüber hinaus übersteigt die selbstlernende Fähigkeit des entwickelten Systems mit einer Vorhersagegenauigkeit von rund 88 %.

Stichwörter

Additive Fertigung, Laser-Powder Bed Fusion, Nickelbasislegierung , 316L rostfreier stahl, dünnwandige Strukturen, Prozessüberwachung