

DISS. ETH NO. 23785

**Development of Oxide Dispersion Strengthened Titanium  
Aluminides for Additive Manufacturing**

A thesis submitted to attain the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

CHRISTOPH KENEL  
MSc ETH

born on 06.08.1987  
citizen of Arth SZ

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Konrad Wegener, examiner  
Dr. Christian Leinenbach, co-examiner  
Prof. Dr. Gordon Tatlock, co-examiner

2016

## Abstract

Titanium aluminides gained a lot of interest over the last decades due to a potential weight reduction and increased performance of high temperature components. Further increasing their performance at high temperatures is a crucial factor to compete with the heavier Ni-base superalloys. Processing this class of structural intermetallics using additive manufacturing is also of great interest to produce novel parts with unprecedented complexity. In this work an oxide dispersion strengthened (ODS) titanium aluminide alloy is developed taking into account the non-equilibrium conditions during beam-based additive manufacturing. In order to understand the influence of cooling rate and composition on microstructure formation, rapid solidification experiments on binary Ti-Al and ternary Ti-Al-Nb and Ti-Al-Mo alloys are performed using a novel experimental liquid droplet quenching technique. In combination with *in situ* X-ray diffraction experiments at a synchrotron light source, the observed behavior of Ti-Al-(Nb, Mo) is mapped and compared to thermodynamic simulations based on the CALPHAD approach taking into account the non-equilibrium nature of the process. Based on this fundamental study, a matrix alloy is selected for production of ODS titanium aluminide by mechanical alloying. Consolidation tests using spark plasma sintering, selective laser melting and direct metal deposition show the influence of the processing route on the formed microstructure and the resulting dispersoid size. Apart from the effects of alloy composition and ODS particle addition on microstructure and processing also the influence on mechanical performance and degradation behavior is studied. Compared to the dispersoid-free alloy, the ODS variant is superior in terms of yield stress and ultimate tensile strength at 293 to 1073 K as well as more oxidation resistant. Finally it is demonstrated that complex lattice structures can be produced from the ODS alloy by selective laser melting. Additionally, the beneficial effect of adapted re-scanning strategies on the occurrence of cracking is discussed.

## Zusammenfassung

Seit rund drei Jahrzehnten sind Titanaluminide im Fokus der Forschung, da ihr Einsatz Gewichtseinsparungen und bessere Eigenschaften in Hochtemperaturkomponenten verspricht. Eine kontinuierliche Verbesserung dieser Eigenschaften ist ein entscheidender Punkt um eine Konkurrenz zu den deutlich dichteren Ni-Basis Superlegierungen zu schaffen. Die additive Fertigung dieser Klasse von intermetallischen Strukturwerkstoffen ist zudem seit kurzem von grossem Interesse um Komponenten mit bisher unerreichter Komplexität zu produzieren. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine oxid-dispersionsverstärkte (ODS) TiAl Legierung entwickelt, wobei die Nichtgleichgewichtsbedingungen während der strahlbasierten additiven Fertigung miteinbezogen wurden. Eine neuartige Methode, basierend auf abgeschreckten Metalltropfen, erlaubt den Einfluss der Kühlrate als auch der Legierungszusammensetzung auf die ausgebildete Mikrostruktur in Ti-Al, Ti-Al-Nb und Ti-Al-Mo zu untersuchen. In Kombination mit *in situ* Röntgenbeugungs-Experimenten an einer Synchrotronquelle wurde das Verhalten der Ti-Al-(Nb,Mo) Systeme bestimmt und unter Berücksichtigung der Nichtgleichgewichtsbedingungen der Prozesse mit thermodynamischen Berechnungen verglichen. Basierend auf dieser Untersuchung wurde eine Zusammensetzung für die Produktion einer ODS Legierung durch mechanisches Legieren ausgewählt. Konsolidierungstests mittels Spark Plasma Sintern, Selektivem Laserschweissen und Laserauftragschweissen zeigen den Einfluss des Prozesses auf die Mikrostrukturbildung und die resultierende Partikelgrösse. Zusätzlich wurde auch der Einfluss der Oxidpartikel auf die mechanische Festigkeit und Oxidationsbeständigkeit bestimmt. Die verstärkte Variante zeigt eine höhere Dehn- und Streck-Grenze sowie Oxidationsbeständigkeit verglichen mit der unverstärkten Variante. Am Ende der Arbeit wird die Herstellung von komplexen Gitterstrukturen mittels Selektivem Laserschweissen demonstriert. Der positive Einfluss von diversen Wiederaufschmelz-Strategien auf die Rissbildung wird ebenfalls diskutiert.