

DISS. ETH NO. 26266

# **Rapid Solidification of Alloys and Selective Laser Melting of Metal Matrix Composites for Abrasive Applications**

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

XIAOSHUANG LI

M.Sc. RWTH AACHEN UNIVERSITY

born on 09.03.1990

citizen of

P.R. China

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Konrad Wegener, examiner

Prof. Dr. Ralph Spolenak, co-examiner

Dr. Christian Leinenbach, co-examiner

2019

## Abstract

Advanced tools with superabrasive grains like diamond and cubic boron nitride are widely applied for machining high strength materials. The emerging Selective Laser Melting process has the potential to embed the superabrasives into such tools, so-called Metal Matrix Composites. Commercially available matrix alloys were developed for the conventional processes like casting, brazing which have cooling rates of several orders of magnitude lower than Selective Laser Melting. The present work focuses on developing new alloys for Metal Matrix Composites by Selective Laser Melting. Computationally assisted alloy screening is a cost-effective mean to narrow the alloy compositions of interest. To pre-screen alloys, rapid solidification experiments were carried out on the Cu-Sn-(Ti) and Ni-Cr-Si systems, which mimic the primary metallurgical process taking place in Selective Laser Melting. The results allow the understanding of the effects of cooling rates and compositions on the microstructural formation. In addition, *in-situ* synchrotron X-ray diffraction helps track phase transformations during the rapid solidification and the underlying mechanisms. Based on the results, a test alloy was selected for Selective Laser Melting. Sets of fundamental processing parameters were investigated to search for the processing window. Two superabrasives, i.e. diamond and cBN, were tested to study the effect of physical properties on the consolidation. It turned out that rapid solidification experiments enabled to estimate microstructure in as-built parts by observation of the same phases in the rapid solidification tests. The superabrasives are soundly bonded to the matrix by the formation of Ti carbides, borides and nitrides. Diamond content varies from 2 to 20 vol.%. Composites with 2 vol.% diamond can be free of cavities while density of defects significantly increases with diamond fractions. Using of Ti coated diamond showed limited improvement of density. However, 10 vol.% of cBN particles were successfully embedded into the final parts with far less defects. Besides, Finite Element Modelling was employed to support the understanding of the consolidation of the melt-diamond suspension. Due to the high thermal conductivity and volumetric heat capacity of diamond, abnormal heat transfer accounts for the occurrence of a large amount of defects and the poor mechanical performance.

## Zusammenfassung

Fortschrittliche Werkzeuge mit superabrasiven Körnern wie Diamant und kubischem Bornitrid (cBN) werden häufig zur Bearbeitung von hochfesten Materialien eingesetzt. Der entstehende Selective Laser Melting Prozess hat das Potenzial, superabrasive Materialien in solche Werkzeuge, sogenannte Metallmatrix-Verbundwerkstoffe, einzubetten. Für die konventionellen Fertigungsverfahren, wie Gießen oder Löten, welche um einige Größenordnungen niedrigere Abkühlraten aufweisen, wurden einige Matrixlegierungen entwickelt. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die Entwicklung neuer Legierungen für Metallmatrix-Verbundwerkstoffe für das Selective Laser Melting. Das rechnergestützte Legierungsscreening ist ein kostengünstiges Mittel, um die gewünschten Legierungszusammensetzungen einzugrenzen. Zur Vorselektion von Legierungen wurden Erstarrungsexperimente mit sehr hohen Abkühlgeschwindigkeiten an den Systemen Cu-Sn-(Ti) und Ni-Cr-Si durchgeführt, die den primärmetallurgischen Prozess des Selective Laser Melting emulieren. Die Ergebnisse ermöglichen, die Auswirkungen sehr hoher Abkühlraten auf Mikrostruktur und Phasenzusammensetzung zu verstehen. Darüber hinaus hilft die *in-situ* Synchrotron-Röntgenbeugung, Phasenumwandlungen während der schnellen Erstarrung zu verfolgen und zugrunde liegende Mechanismen zu verstehen. Basierend auf den erhaltenen Ergebnissen wurde eine Testlegierung für das Selective Laser Melting ausgewählt. Die möglichen Prozessfenster wurden durch Variation verschiedener Prozessparametersätze ermittelt. Zwei Superabrasives, Diamant und cBN, wurden hinsichtlich des Einflusses ihrer physikalischen Eigenschaften auf die Erstarrung untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass die Schnellerstarrungsexperimente geeignet sind, die Vorgänge bei der Erstarrung im SLM-Prozess darzustellen, da typische metastabile Phasen in beiden Prozessen gleichermaßen auftreten. Superabrasives werden durch die Bildung von Ti-Carbiden, Boriden und Nitriden fest mit der Matrix verbunden. Der Diamantgehalt variiert in den Experimenten zwischen 2 und 20 Vol.-%. Verbundwerkstoffe mit 2 Vol.-% Diamant können ohne Porosität hergestellt werden, während die Defektdichte mit steigendem Diamantanteil deutlich zunimmt. Die Verwendung von Ti-beschichtetem Diamant

zeigte nur eine begrenzte Verbesserung der Dichte. Hingegen konnten 10 Vol. % cBN-Partikel erfolgreich und mit deutlich weniger Defekten in den Verbundwerkstoff eingebettet werden. Mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente konnte aufgezeigt werden, dass die Diamantkörner durch ihre hohe Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität zu einer vorzeitigen Erstarrung des Metalls in ihrer unmittelbaren Umgebung und damit zu Anbindefehlern führen. Diese Arbeit lieferte ein Verständnis für das Erstarrungsverhalten von Verbundwerkstoffen sowie Handlungsempfehlungen für die metalladditive Herstellung solcher Verbundwerkstoffe.