

## Robustness of Powder Metallurgical Ti-6Al-7Nb and Ti-6Al-7Nb-xFe Alloys against Oxygen and Carbon Pick-up

Alexandra Amherd Hidalgo

Stichwörter: Titanlegierungen, Metallpulver-Spritzgießen, Sauerstoff, Kohlenstoff, Sinterhilfe

**Zusammenfassung.** Die Pulvermetallurgie (PM) von Titan ist eine vielversprechende und kostengünstige Alternative zur herkömmlichen Herstellung von Titan-Bauteilen mittels Umformtechniken. Zusammen mit Press- und Sinterverfahren ist das Metallpulver-Spritzgießen (MIM: Metal Injection Moulding) die bekannteste PM-Technologie. Die Herstellung von Hochleistungskomponenten aus Titan mittels MIM ist jedoch nach wie vor eine Herausforderung. Die hohe Affinität von Titan zu interstitiellen Elementen und die Auswirkung der MIM-Restporosität sind zwei wichtige Aspekte, die den Anwendungsbereich begrenzen. Diese Untersuchung zielt darauf ab, die Wirkung von Zwischengitteratomen (Sauerstoff und Kohlenstoff) und die Verwendung eines Sinterhilfsmittels (Eisen) auf die Zugfestigkeits- und Dauerfestigkeitseigenschaften (HCF) von Ti-6Al-7Nb, prozessiert mittels MIM, zu verstehen.

Die Proben wurden unter Verwendung von gasverdüstertem vorlegiertem Ti-6Al-7Nb-Pulver und elementarem Eisenpulver hergestellt. Verschiedene Eisengehalte wurden zu Ti-6Al-7Nb zugegeben, um die Sinteraktivität zu untersuchen. Um die Wirkung von Zwischengitteratomen zu untersuchen, wurden Ti-6Al-7Nb-Proben mit verschiedenen Sauerstoffgehalten hergestellt. Außerdem wurden Ti-6Al-7Nb-2Fe-Proben mit unterschiedlichem Kohlenstoffgehalt in Abhängigkeit von den atmosphärischen Bedingungen während des Sinterns, untersucht. Zur mechanischen Charakterisierung wurden Zugversuche und 4-Punkt-Biegeermüdungsversuche durchgeführt.

Diese Studie zeigt, dass Eisen die Sinteraktivität von Ti-6Al-7Nb durch beschleunigte Diffusionsprozesse erhöht. Darüber hinaus verbessert es die Festigkeit mit einer entsprechenden Abnahme der Duktilität aufgrund von Änderungen der Verformungsarten. Eine geringe Zugabe von Eisen ändert die HCF-Eigenschaften nicht signifikant. Die Kombination von Eisenzugaben und niedrigeren Sintertemperaturen zur Verringerung der Produktionskosten scheint daher vielversprechend zu sein.

Andererseits wurde bestätigt, dass Sauerstoff und Kohlenstoff eine stark verfestigende Wirkung haben. Eine übermäßige Menge an Sauerstoff könnte jedoch, aufgrund von Änderungen der Verformungsmodi und Mikrostrukturmerkmalen, einen dramatischen Abfall der Duktilität verursachen. Es wurde festgestellt, dass diese Merkmale zur Verfestigung und zum Verlust der Duktilität beitragen und durch eine optimierte Abkühlrate während des Sinterzyklus gesteuert werden können. Zusätzlich kann eine übermäßige Menge an Kohlenstoff die Bildung von TiC-Ausscheidungen verursachen, die die Duktilität verringert. Darüber hinaus wurde herausgefunden, dass Sauerstoff eine fortschreitende Reduktion der HCF-Eigenschaften bewirkt.

Diese Studie zeigt weiter, dass die Verwendung von heißisostatischem Pressen (HIP) für Zug- und HCF-Eigenschaften von sauerstoffarmen Komponenten vorteilhaft ist. Bei Komponenten mit hohem Sauerstoffgehalt erwies sich HIP jedoch als nachteilig für die Zugeigenschaften, aber vorteilhaft für das HCF-Verhalten.

Zusammenfassend legen diese Ergebnisse nahe, dass die Verwendung von Eisen als kostengünstiges Sinterhilfsmittel die Möglichkeit bietet, die Produktionskosten zu senken, während die mechanischen Eigenschaften von Ti-6Al-7Nb erhalten bleiben. Darüber hinaus erlaubt das gewonnene Verständnis der Funktion der interstitiellen Elemente, exzellente mechanische Eigenschaften von MIM- $\alpha$  +  $\beta$ -Legierungen zu erreichen, die weit höhere Sauerstoffwerte aufweisen als üblicherweise in den Normen gefordert.

## Robustness of Powder Metallurgical Ti-6Al-7Nb and Ti-6Al-7Nb-xFe Alloys against Oxygen and Carbon Pick-up

Alexandra Amherd Hidalgo

Keywords: titanium alloys, metal injection moulding, oxygen, carbon, sintering aid

**Abstract.** Powder metallurgy (PM) of titanium is a promising alternative to the conventional manufacturing of wrought titanium for cost-effective production of components. Beside of pressing and sintering, metal injection moulding (MIM) is the most established PM technology. However, the manufacture of high-performance titanium components by MIM is still challenging. The high affinity which titanium has for interstitial elements and the effect of MIM residual porosity are two important aspects that limit the range of applications. This investigation aims to understand the effect of interstitials (oxygen and carbon) and the use of a sintering aid (iron) on the tensile and high cycle fatigue (HCF) properties of Ti-6Al-7Nb processed by MIM.

Specimens were manufactured using Ti-6Al-7Nb gas atomised pre-alloyed powder and elemental iron powder. Different iron contents were used in Ti-6Al-7Nb in order to study the sintering activity. To investigate the effect of interstitials, various oxygen contents were introduced in Ti-6Al-7Nb specimens. In addition, Ti-6Al-7Nb-2Fe specimens with different carbon contents depending on the atmospheric conditions during sintering were measured. For mechanical characterisation tensile and high cycle 4-point bending fatigue tests were performed.

This study reveals that iron enhances the sintering activity of Ti-6Al-7Nb by accelerated diffusion processes. Moreover, it improves the strength with a corresponding decrease of ductility due to changes in the deformation modes. Furthermore, a small addition of iron does not significantly modify the HCF properties. Therefore, the combination of iron and lower sintering temperatures appears successful for reducing production costs.

On the other hand, it was confirmed that oxygen and carbon have a potent strengthening effect. However, an excessive amount of oxygen might cause a dramatic drop of ductility due to deformation mode changes and microstructure features. It has been identified that these features contribute to strengthening and loss of ductility and can be controlled using an optimised cooling rate during the sintering cycle. In addition, an excessive amount of carbon can cause the formation of TiC precipitates that reduces ductility. Moreover, it was found that oxygen produces a progressive reduction of HCF properties.

In addition, this study demonstrates that the use of hot isostatic pressing (HIP) was beneficial for tensile and HCF properties of low-oxygen components. However, in high-oxygen components, HIP was found to be detrimental for tensile properties but beneficial for HCF behaviour.

In summary, these findings suggest that the use of iron as a low-cost sintering aid offers the possibility to reduce production costs while maintaining the mechanical properties of Ti-6Al-7Nb. Furthermore, based on the gained understanding of the function of interstitials it is now possible to achieve excellent mechanical properties of MIM  $\alpha+\beta$  alloys with oxygen contents far beyond the common standard limits.