
Light Engineering für die Praxis

Reihe herausgegeben von
C. Emmelmann, Hamburg, Deutschland

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/13397>

Technologie- und Wissenstransfer für die photonische Industrie ist der Inhalt dieser Buchreihe. Der Herausgeber leitet das Institut für Laser- und Anlagensystemtechnik an der Technischen Universität Hamburg-Harburg sowie das LZN Laser Zentrum Nord, eine 100%ige Tochter der TU Hamburg-Harburg und der Freien und Hansestadt Hamburg. Die Inhalte eröffnen den Lesern in der Forschung und in Unternehmen die Möglichkeit, innovative Produkte und Prozesse zu erkennen und so ihre Wettbewerbsfähigkeit nachhaltig zu stärken. Die Kenntnisse dienen der Weiterbildung von Ingenieuren und Multiplikatoren für die Produktentwicklung sowie die Produktions- und Lasertechnik, sie beinhalten die Entwicklung lasergestützter Produktionstechnologien und der Qualitätssicherung von Laserprozessen und Anlagen sowie Anleitungen für Beratungs- und Ausbildungsdienstleistungen für die Industrie.

Eric Wycisk

Ermüdungseigenschaften der laseradditiv gefertigten Titanlegierung TiAl6V4

Eric Wycisk
Hamburg, Deutschland

Light Engineering für die Praxis
ISBN 978-3-662-56059-4 ISBN 978-3-662-56060-0 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-56060-0>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag GmbH Deutschland 2017

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Deutschland
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Laser Zentrum Nord GmbH (LZN).

Mein Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Claus Emmelmann, Leiter des Instituts für Laser- und Anlagensystemtechnik (iLAS) der TU Hamburg-Harburg und Geschäftsführer der LZN GmbH, für seine engagierte Betreuung dieser Arbeit sowie der Möglichkeit zur beruflichen Gestaltung und Entfaltung am LZN. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. F. Walther, Leiter des Fachgebiets Werkstoffprüftechnik der TU Dortmund, für die Übernahme des Koreferats und den intensiven fachlichen Austausch sowie der Möglichkeit zur Nutzung der Versuchsstände seines Instituts. Mein Dank gilt ebenfalls Herrn Prof. Dr.-Ing. F. Thielecke für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ich danke allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des iLAS und LZN sowie allen studentischen Hilfskräften und Studien- und Diplomarbeitern, die mich bei der Umsetzung dieser Arbeit unterstützt haben. Darüber hinaus möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen bedanken, die mich in dieser spannenden Zeit begleitet haben und mit denen ich zum Großteil weiterhin freundschaftlich verbunden sein werde.

Besonderer Dank gilt Shafaqat Siddique, der mich als Masterarbeiter und späterer wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet von Prof. Walther in der Durchführung einer Vielzahl von Versuchen unterstützt hat und stets für angeregte Diskussionen zur Verfügung stand. Außerdem möchte ich Herrn Franz Terborg hervorheben und mich bei ihm herzlichst für die immerwährende Unterstützung bei allen anlagentechnischen Belangen sowie der Fertigung und Endbearbeitung der Proben bedanken.

Abschließend danke ich meiner Familie und meinen Freunden, die mich stets tatkräftig fördern und in meinen getroffenen Entscheidungen unterstützen. Ganz besonderer Dank gilt dabei meiner Freundin Lydia, die mich mit ihrem Verständnis, ihrer Motivation und Unterstützung durch alle herausfordernden Zeiten begleitet.

Hamburg, im August 2017

Eric Wycisk

Summary

Additive Manufacturing allows for new product designs and business cases by creating complex three-dimensional parts through simple two-dimensional manufacturing steps. In addition to manufacturing prototypes, Laser Additive Manufacturing is increasingly used for production of functional components. In the aerospace industry the alloy Ti-6Al-4V is of particular interest due to its high specific strength and corrosion resistance. However, the high demands of the aviation industry on quality and structural integrity of components require detailed knowledge of the mechanical properties of additively manufactured parts. Particularly with regard to oscillating loads, the influence of individual material and part properties on the fatigue behavior must be known. Therefore, this dissertation examines the influence of individual material and part properties on the fatigue behavior of laser additive manufactured Ti-6Al-4V in detail.

In order to comprehensively characterize the fatigue performance, the individual process steps from life cycle of laser additive manufactured components are described and their resulting material and part properties are derived. Layer orientation, surface properties, microstructure and residual porosity are identified as the primary influencing properties on the fatigue performance of laser additive manufactured Ti-6Al-4V parts. To analyze the influence of the identified material and part properties Wöhler tests are carried out in a range of up to 10^9 cycles under tension-tension, tension-compression and bending loading. Surface roughness and process inherent material defects have been identified as the main drivers to decrease fatigue strength of laser additive manufactured Ti-6Al-4V. However, it is demonstrated that known fracture mechanical models can be applied to assess the influence of these defects. In this dissertation models from Murakami and Kitagawa are successfully used to predict the influence of identified defects on the fatigue life. In contrast to low fatigue strength due to process inherent defects, the results of thermo-mechanically finished samples show very high fatigue strength in the range of forged Ti-6Al-4V. In additional investigations influence of layer orientation on neither crack propagation nor crack nucleation can be identified. Thus, the assumption of isotropic material behavior is confirmed. Finally the alternating deformation behavior is investigated by the means of thermometry. The results show, that thermometry offers an efficient and economical testing method to estimate the fatigue strength with only one production test sample required for testing.

Concluding, the determined fatigue properties are presented in an overview diagram, which shows the influence of the specific structural properties resulting from the corresponding process step of the life cycle on the fatigue behavior. The degree of influence is quantified by the resulting fatigue strength and crack growth rate.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	IX
Nomenklatur und Abkürzungsverzeichnis	XI
1 Einleitung	1
2 Pulverbettbasierte laseradditive Fertigung	5
2.1 Verfahrensdefinition	5
2.2 Technologieprinzip der laseradditiven Fertigung	6
2.3 Dominante Stellgrößen des Fertigungsprozesses	8
2.4 Eigenschaftsprofil laseradditiv gefertigter Bauteile	10
3 Ermüdung metallischer Werkstoffe	13
3.1 Wöhlerversuch	13
3.2 Wechselverformungsverhalten	15
3.3 Einfluss von Rissen und Porosität auf die Lebensdauer	17
4 Die Titanlegierung TiAl6V4	23
4.1 Eigenschaftsprofil von $\alpha + \beta$ -Titanlegierungen	23
4.2 Ermüdung von TiAl6V4	26
4.2.1 Einfluss der Mikrostruktur auf die Ermüdungseigenschaften	26
4.2.2 Einfluss der Oberflächenbearbeitung auf die Ermüdungseigenschaften	29
4.2.3 Einfluss des Einsatzspektrums auf die Ermüdungseigenschaften	32
4.3 Eigenschaftsprofil von laseradditiv gefertigtem TiAl6V4	35
5 Vorgehensweise und experimentelle Methoden	41
5.1 Ermittlung der Prozess-Struktur-Ermüdungseigenschaftswirkung	41
5.2 Experimentelle Methoden	45
5.2.1 Servohydraulische Schwingprüfung im HCF-Bereich	45
5.2.2 Resonanzprüfung im HCF-Bereich	46
5.2.3 Ultraschall-Resonanzprüfung im VHCF-Bereich	48
5.2.4 Umlaufbiegeprüfung	48
5.2.5 Rissfortschrittsprüfung	49
6 Charakterisierung des Versuchswerkstoffs	51
6.1 Anlagentechnik und Prozessparameter der Werkstoffherstellung	51
6.2 Mikrostruktur und chemische Zusammensetzung	53
6.3 Dichte und Porosität	56
6.4 Oberflächenbeschaffenheit und Eigenspannungen	57
6.5 Härte und quasistatische Materialeigenschaften	62

7	Ermüdungseigenschaften von laseradditiv gefertigtem TiAl6V4	65
7.1	Einfluss der Schichtorientierung auf die Ermüdungseigenschaften	65
7.1.1	Rissfortschrittsuntersuchungen.....	65
7.1.2	Einstufiger Ermüdungsversuch gekerbter Proben	69
7.2	Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf die Ermüdungseigenschaften	71
7.2.1	Untersuchung unbearbeiteter Oberflächen	72
7.2.2	Untersuchung polierter Oberflächen.....	74
7.2.3	Untersuchung gestrahlter Oberflächen	76
7.3	Einfluss der Porosität auf die Ermüdungseigenschaften	78
7.3.1	Identifikation und Klassifizierung von Materialdefekten	78
7.3.2	Einfluss des HIP-Prozesses auf die Ermüdungseigenschaften	82
7.4	Ermüdungsfestigkeit in Abhängigkeit identifizierter Materialdefekte	84
7.5	Einfluss des Einsatzspektrums auf die Ermüdungseigenschaften	89
7.5.1	Untersuchung im Zug-Druck-Bereich bis 10^7 Lastspiele	89
7.5.2	Untersuchungen im Zug-Druck-Bereich bis 10^9 Lastspiele	92
7.5.3	Untersuchung im Umlaufbiegeversuch	97
7.5.4	Mittelspannungssensitivität	100
7.6	Wechselverformungsverhalten.....	102
8	Zusammenfassung und Ausblick	105
	Literaturverzeichnis	109

Nomenklatur und Abkürzungsverzeichnis

Lateinische Symbole		
A	%; m ²	Bruchdehnung, Fläche
B	mm	Probendicke
C	1	Paris-Faktor
D_S	μm	Schichtstärke
E	GPa	E-Modul
E_V	J/m ³	Volumenenergie
F_{max}	N	Maximalkraft
K	MPa·m ^{-1/2}	Spannungsintensitätsfaktor
K'	MPa	Verfestigungskoeffizient
K_{IC}	MPa·m ^{-1/2}	Bruchzähigkeit
K_{max}	MPa·m ^{-1/2}	Maximaler Spannungsintensitätsfaktor
K_{min}	MPa·m ^{-1/2}	Minimaler Spannungsintensitätsfaktor
K_Q	MPa·m ^{-1/2}	Kritischer Spannungsintensitätsfaktor
K_t	1	Kerbfaktor
ΔK_0	MPa·m ^{-1/2}	Schwellspannungsintensitätsfaktor (engl. ΔK_{th})
N	1	Lastspielzahl
N_B	1	Bruchlastspielzahl
N_G	1	Grenzlastspielzahl
P_L	W	Laserleistung
$P_{L,max}$	W	Maximale Laserleistung
R	1; 1; Ω	Aufbaurrate; Spannungsverhältnis; elektr. Widerstand
R_a	μm	Taktile arithmetische Mittenrauheit
R_m	N/mm ²	Zugfestigkeit
R_{max}	μm	Rautiefe
$R_{p0,2}$	N/mm ²	Streckgrenze

R_K	1	Spannungsintensitätsfaktorverhältnis
R_z	μm	Taktile gemittelte Rautiefe
S_a	μm	Optische arithmetische Mittenrauheit
S_z	μm	Optische gemittelte Rautiefe
T	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$	Temperatur
W	mm	Probenbreite
Y	1	Geometriefaktor
a	m	Risslänge
$a_{\text{äqu}}$	m	Äquivalente Risslänge
a_0	m	Charakteristische Risslänge
$a_{0,\text{äqu}}$	m	Äquivalente charakteristische Risslänge
b	1	Ermüdungsfestigkeitsexponent
h	m	Oberflächenabstand
h_s	μm	Spurabstand
m	1	Paris-Exponent
n	1	Vielfaches einer Schicht oder Spur
n'	1	Verfestigungsexponent
r	m	Radius
t	s	Zeit
v_s	m/s	Belichtungsgeschwindigkeit
x, y, z	-	Raumkoordinaten

Griechische Symbole

Δ	1	Änderung
$\Delta\sigma_{\text{max,Stufe}}$	MPa	Änderung der Maximalspannung im Treppenstufenverfahren und im Laststeigerungsversuch
α	1	hdp-Phase von Titanlegierungen
α'	1	martensitische Phase von Titanlegierungen

α_k	1	Kerbformzahl
β	1	krz-Phase von Titanlegierungen
$\varepsilon_{a,p}$	%	plastische Dehnungsamplitude
$\varepsilon_{a,t}$	%	Totaldehnungsamplitude
$\varepsilon_{a,p}$	%	plastische Mitteldehnung
ε_t	%	Totaldehnung
λ	nm	Wellenlänge
σ	MPa	Nennspannung
σ_a	MPa	Spannungsamplitude
σ'_B	1	Ermüdungsfestigkeitskoeffizient
σ_D	MPa	Dauerfestigkeit
σ_{eff}	MPa	Effektive Spannung
σ_m	MPa	Mittelspannung
σ_{max}	MPa	Maximalspannung
$\sigma_{max,start}$	MPa	Startmaximalspannung im Laststeigerungsversuch
σ_{min}	MPa	Minimalspannung
$\sigma_{th,10^7}$	MPa	Theoretische Ermüdungsfestigkeit bei 10^7 Lastspielen
σ_{10^7}	MPa	Ermüdungsfestigkeit bei 10^7 Lastspielen
σ_{10^9}	MPa	Ermüdungsfestigkeit bei 10^9 Lastspielen

Abkürzungen

2½D	Zwei-ein-halb-dimensional
3D	Dreidimensional
AIMS	Airbus Material Specification
AMS	Aerospace Material Specification
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	Rechnergestütztes Konstruieren (engl. computer aided design)

DIN	Deutsches Institut für Normung
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
DMP	Direct Metal Printing
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
EN	Europäische Norm
HCF	High-Cycle-Fatigue
HIP	Heißisostatisches Pressen
ICP-OES	optische Emissionsspektrometrie mittels induktiv gekoppelten Plasmas
ISO	Internationale Organisation für Normung
LAM	Laseradditive Fertigung (engl. Laser Additiv Manufacturing)
NDT	Nichtzerstörende Prüfung (engl. non-destructive testing)
QS	Qualitätssicherung
REM	Rasterelektronenmikroskop
SLM	Selective Laser Melting
STL	Standard Tessellation Language
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VHCF	Very-High-Cycle-Fatigue
XWB	Extra Wide Body
Yb:YAG	Ytterbium-dotiertes Yttrium-Aluminium-Granat
ZSD	Zyklische Spannung-Dehnung
