



©123RF.com / MAURO ROTA

Detaillierte Untersuchungen

Bewertung des Ermüdungsverhaltens von Bauteilen bei hohen Lastspielzahlen

Die Entwicklungen im Bereich der Schwingprüfsysteme erweitern den Stand der Technik entscheidend. Dies ermöglicht detaillierte Untersuchungen unter betriebsrelevanten Bedingungen. Damit erhalten Anwender leistungsfähige Werkzeuge, um unter anderem die Auswirkung von Gefügeveränderungen auf die funktionale Leistungsfähigkeit von Bauteilen zu ermitteln.

Jochen Tenkamp, Shafaqat Siddique und Frank Walther

Bauteile aus Legierungen auf Aluminium-, Titan-, Stahl- und Nickel-Basis sind im Automobilbereich und in der Luft- und Raumfahrt oft zyklischen Belastungen ausgesetzt. Im Betrieb ertragen sie oft Lastspielzahlen von über 10^7 . Bisher war der Stand des Wissens, dass Werkstoffe nicht durch Ermüdung ausfallen, wenn die einwirkende Belastung unterhalb der sogenannten Dauerfestigkeit liegt. Mit neuen Testmethoden wurden allerdings Ausfälle im Bereich sehr hoher Lastspielzahlen (Very

High Cycle Fatigue, VHCF) für Belastungen unterhalb der „Dauerfestigkeit“ festgestellt. Dies lässt darauf schließen, dass eine derartige „Grenze“ nicht existiert [1, 2].

Einige Legierungen der Gittertypen kubisch-raumzentriert (krz) und kubisch-flächenzentriert (kfz) zeigen außerdem im VHCF-Bereich eine Verschiebung der Rissinitiierung von der Oberfläche ins Volumen, sodass der Schädigungsmechanismus je nach Betriebsdauer wechselt [3]. Durch diese Erkenntnisse rücken heute

Auslegungskenngrößen für sicherheitsrelevante Bauteile im VHCF-Bereich immer stärker in den Fokus, beispielhaft sind Motorenkomponenten ($\geq 10^8$ Lastwechsel), Wälzlager ($\geq 10^9$ Lastwechsel) und Gasturbinen ($\geq 10^{10}$ Lastwechsel) zu nennen.

Mit konventionellen servohydraulischen und Resonanzschwingprüfsystemen können Prüffrequenzen bis 300 Hz erreicht werden. Ein Ermüdungsversuch bis 10^9 Lastwechsel würde circa 58 Tage dauern. Diese Systeme sind daher zur Ermitt-

lung von Ermüdungskennwerten im VHCF-Bereich ungeeignet, insbesondere wenn Aussagen zur Streuung der Kennwerte getroffen werden müssen, die eine große Versuchszahl erfordern.

Durch die Weiterentwicklung piezoelektrischer Aktuatoren ist es mit Ultraschallschwingprüfsystemen möglich, Versuche bei Frequenzen von 20 kHz durchzuführen, wodurch sich die Prüfdauer für 10^9 Lastwechsel auf 14 Stunden reduziert [1]. Damit ist heute eine effiziente Bewertung des Ermüdungsverhaltens bei sehr hohen Lastspielzahlen gewährleistet.

Experimentelle Methodik

Die experimentelle Methodik und das Leistungsvermögen werden anhand des Ultraschallschwingprüfsystems USF-2000, Shimadzu, Duisburg, gezeigt. Ein piezoelektrischer Kristall wird als Aktuator verwendet,

der bei 20 kHz schwingt. Gemäß Probendesign liegen die Maximalbeanspruchung in der Probenmitte und die maximale Auslenkung am freien Probenende vor. Die Probe wird einseitig mittels Gewinde in das Prüfsystem eingeschraubt und ist am unteren Ende frei (Bild 1a).

Um durch Verformung bei hoher Prüffrequenz ausgelöste Temperaturerhöhungen der Proben zu vermeiden, werden diese im Versuch mit Druckluft gekühlt (Bild 1b oben) und mit einem Impuls-Pause-Verhältnis von z. B. 50:50 geprüft, d. h. das System wird für 200 ms in Resonanz versetzt und danach für 200 ms gestoppt. Die Kontrolle der Temperaturentwicklung kann mithilfe eines Pyrometers (Bild 1b unten) erfolgen. Das Probenversagen wird durch die Änderung der Resonanzfrequenz detektiert. Führt ein Riss zum endgültigen Bruch, reduziert die Eigenfrequenz die Arbeitsfrequenz des Systems und der Test wird >>>

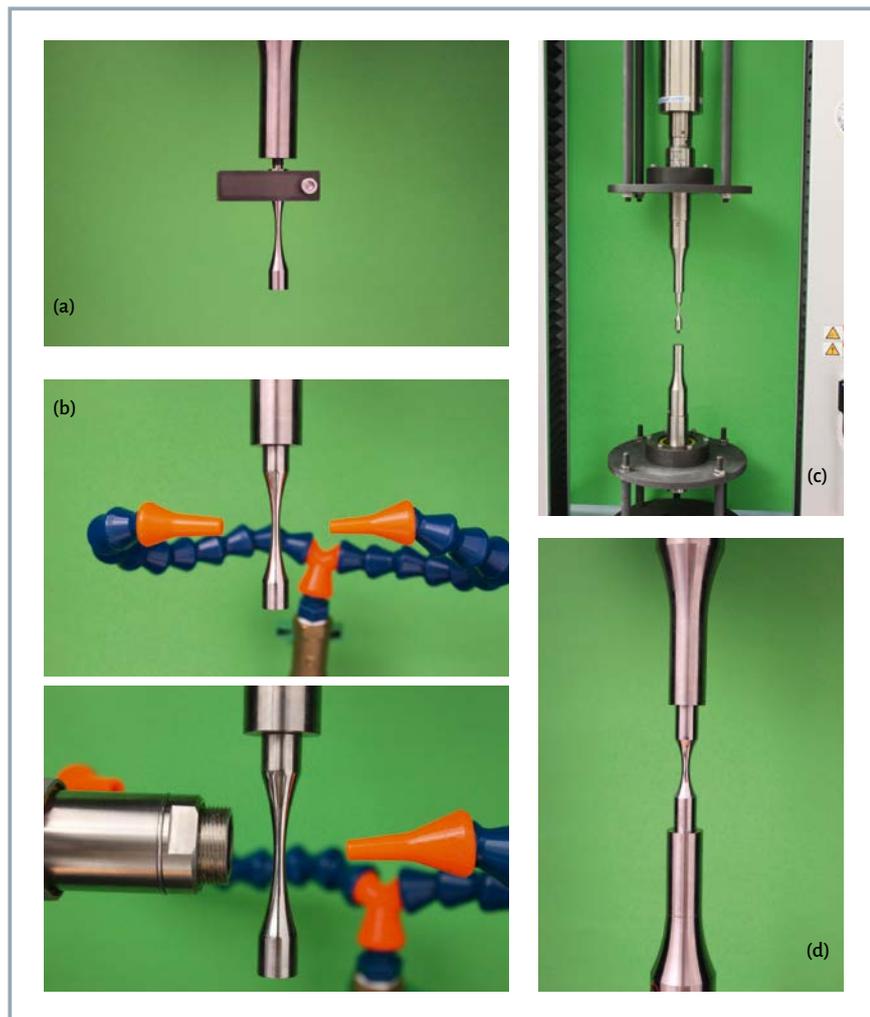


Bild 1. a) Montage der Proben, b) Druckluftkühlung (oben) und pyrometrische Messung der Temperaturentwicklung (unten), c und d) beidseitige Montage der Proben in der Mittellast-Konfiguration

(© TU Dortmund)

INFORMATION & SERVICE

LITERATUR

- 1 Pyttel, B.; Schwerdt, D.; Berger, C.: Very high cycle fatigue – Is there a fatigue limit? International Journal of Fatigue 33 (2011), Elsevier, Amsterdam, S. 49–58
- 2 Benedetti, M.; Fontanari, V.; Bandini, M.: Very high cycle fatigue resistance of shot-peened high strength aluminium alloys. Experimental and Applied Mechanics 4 (2013), Springer Verlag, Heidelberg, S. 203–211
- 3 Morrissey, R. J.; Nicholas, T.: Fatigue strength of Ti-6Al-4V at very long lives. International Journal of Fatigue 27 (2005), Elsevier, Amsterdam, S. 1608–1612
- 4 Wycisk, E.; Siddique, S.; Herzog, D.; Walther, F.; Emmelmann, C.: Fatigue performance of laser additively manufactured Ti-6Al-4V in very high cycle fatigue regime up to 10^9 cycles. Frontiers in Materials 2:72 (2015), Springer Verlag, Heidelberg, S. 1–8
- 5 Siddique, S.; Imran, M.; Wycisk, E.; Emmelmann, C.; Walther, F.: Influence of process-induced microstructure and imperfections on mechanical properties of AlSi12 processed by selective laser melting. Journal of Materials Processing Technology 221 (2015), Elsevier, Amsterdam, S. 205–213
- 6 Siddique, S.; Imran, M.; Rauer, M.; Kaloudis, M.; Wycisk, E.; Emmelmann, C.; Walther, F.: Computed tomography for characterization of fatigue performance of selective laser melted parts. Materials & Design 83 (2015), Elsevier, Amsterdam, S. 661–669
- 7 Siddique, S.; Imran, M.; Walther, F.: Very high cycle fatigue and fatigue crack propagation behavior of selective laser melted AlSi12 alloy. International Journal of Fatigue, 2016, Elsevier, Amsterdam

AUTOREN

Jochen Tenkamp, M. Sc., geb. 1988, und **Shafaqat Siddique**, M. Sc. geb. 1982, sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Fachgebiet Werkstoffprüftechnik (WPT), Technische Universität Dortmund.
Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Walther, geb. 1970, ist Institutsleiter ebendort.

KONTAKT

Jochen Tenkamp, M. Sc.
 T 0231 755-8425
 jochen.tenkamp@tu-dortmund.de

QZ-ARCHIV

Diesen Beitrag finden Sie online:
www.qz-online.de/2231429

Charge	rel. Dichte	R _m	R _{p0,2}	A _t
	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]
I	99,7	372,3 ± 27,2	218,0 ± 6,9	3,41 ± 0,29
II	99,8	361,1 ± 4,5	201,5 ± 3,7	4,05 ± 0,15

Tabelle 1. Porosität und quasistatische Kennwerte für AlSi12-Proben der Chargen I und II [5, 6]

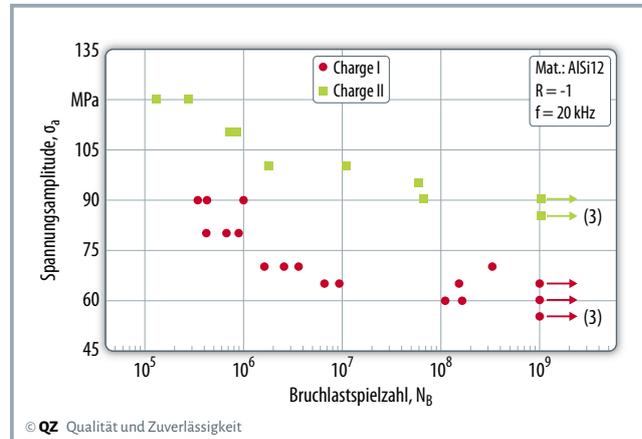


Bild 2. Wöhlerkurven für AlSi12-Proben der Chargen I und II [7]
 (© Quelle: TU Dortmund)

automatisiert beendet. Aufgrund des freien Probenendes können die Proben mit dem Prüfsystem in Standardkonfiguration nur mittelspannungsfrei geprüft werden. Viele ermüdungsbeanspruchte Bauteile unterliegen im Betrieb allerdings einer überlagerten statischen Beanspruchung, z. B. durch eine aufgebraute statische Last (Eigengewicht) oder durch prozessinduzierte Eigenspannungen (Kugelstrahlen).

Diese überlagerten statischen Mittel-lasten haben einen signifikanten Einfluss auf die Schädigungsmechanismen und die Lebensdauer von Bauteilen. Überlagerte statische Zugspannungen verringern hierbei die Lebensdauer, während Druckspannungen diese verlängern [4]. Um diese Spannungszustände auch im VHCF-Bereich abbilden zu können, wurde das Prüfsystem um einen äußeren Lastrahmen, d. h. die Mittellast-Konfiguration, erweitert. Der Einbau der Probe erfolgt durch beidseitiges Einschrauben in den Ultraschallprüfstand mit minimalem Aufwand (Bilder 1c und 1d), anschließend können VHCF-Versuche mit überlagerter Mittellast durchgeführt werden.

Experimentelle Ergebnisse

Die Effizienz des Prüfsystems und die Nutzung von VHCF-Kennwerten zur produktionsbegleitenden Bewertung der funktionalen Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit soll anhand eines Beispiels aus der ad-

ditiven Fertigung erläutert werden. Hierzu wurden mittels selektiven Laserschmelzens (Selective Laser Melting, SLM) Proben aus AlSi12 hergestellt. Durch Anpassung der SLM-Prozessparameter wurden zwei Chargen I und II mit unterschiedlich ausgeprägter Porosität hergestellt.

Tabelle 1 beinhaltet die relative Dichte und die im Zugversuch gemäß ISO 6892-1:2009 ermittelten Eigenschaften für beide Chargen. Ein Unterschied im Porenanteil der Proben ist anhand der relativen Dichte erkennbar, Gefügeschliffe belegen die Reduktion großformatiger ermüdungskritischer Gasporen in Charge II [5, 6]. Die Versuche bestätigen, dass Ermüdungsbrüche jenseits des HCF-Bereichs ($\geq 10^7$ Lastwechsel) auftreten und dass die Ermüdungsfestigkeit von Proben der Charge II um ca. 45 Prozent über der von Proben der Charge I liegt (Bild 2).

Diese Unterschiede in der Leistungsfähigkeit können mittels Zugversuchen nicht bestimmt werden, Charge II wird sogar eine leicht niedrigere Leistungsfähigkeit zugeordnet. Lediglich die VHCF-Kennwerte eignen sich als sensitive und zuverlässige Bewertungsgröße für die mechanische Leistungsfähigkeit zyklisch beanspruchter Werkstoffe und Bauteile. Durch die zeit- und kosteneffiziente Prüfung kann zudem eine abgesicherte Ermüdungsfestigkeit für 10^9 Lastwechsel für Charge I von $60,5 \pm 4,7$ MPa und für Charge II von $88,7 \pm 3,3$ MPa ermittelt werden [7]. ■