

Programm

zur Frühjahrssitzung der DGM / DVM - AG Materialermüdung am 5. und 6. März 2020 in Neuhausen am Rheinfall

Donnerstag, 5. März 2020

10:00 **Rundgang bei RUMUL / Russenberger Prüfmaschinen AG**
(Gewerbestr. 10, CH-8212 Neuhausen am Rheinfall)

11:00 **Rundgang bei STP / Suisse Technology Partners AG**
(Querstraße 5, 8212 Neuhausen am Rheinfall)

12:30 **Imbiss beim Tagungsraum bei STP**

13:00 – 13:30

M. Berchtold (RUMUL), G. Bergmann (STP), U. Krupp (RWTH Aachen), G. Biallas (HAW Hamburg)

Begrüßung – Organisation – Vorstellung RUMUL / STP

13:30 – 14:00

A. Koch^{1*}, M. Teschke¹, L. Lücker¹, M. Bonhage², B.-A. Behrens², F. Walther¹ (¹TU Dortmund, ²Leibniz Universität Hannover)

Mikrostruktur- und widerstandsbasierte Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens von feldaktiv gesinterten Halbzeugen aus wiederverwerteten Aluminiumspänen der Legierung EN AW-6082

Vor dem Hintergrund des Klimawandels stellt die Möglichkeit, Halbzeuge durch direkte Wiederverwertung von Schrotten, wie beispielsweise Aluminiumspänen, herzustellen, eine vielversprechende Alternative zum konventionellen, energieintensiven Wiedereinschmelzen dar. Eine neue, innovative Prozesskette zur direkten Wiederverwertung von Aluminiumspänen besteht aus einem Kaltfließprozess, einem feldaktiven Sinterprozess (FAST) zur Konsolidierung der Späne und schließlich einem Voll-Vorwärtsfließpressprozess zur Herstellung der Halbzeuge. Besondere Bedeutung im Prozess kommt der Entfernung der Oxidbelegungen auf den einzelnen Spänen zu, um ein Verschweißen dieser erst zu ermöglichen. Die mechanischen Eigenschaften der Halbzeuge hängen entscheidend von der Qualität der Schweißnähte zwischen den einzelnen Spänen ab. Im Vergleich zu Ansätzen, bei denen die Oxidbelegungen durch hohe Scherspannungen und Verformungen aufgebrochen werden, sind die quasistatischen und zyklischen Eigenschaften bei Anwendung der neuen Prozesskette deutlich erhöht. Die mittels Computertomographie ermittelte Defektstruktur der aus den Halbzeugen entnommenen Proben, die die Lebensdauer signifikant beeinflusst, konnte mit initialen Widerstandsmessungen der Ermüdungsproben korreliert werden. Diese Ergebnisse wurden schließlich dazu verwendet, ein Modell zur Berechnung der Lebensdauer auf Grundlage einzelner Widerstandsmessungen vor den Ermüdungsversuchen aufzustellen.

14:00 – 14:30

J. Tenkamp^{1*}, S. Scherbring², S. Gerbe³, W. Michels², U. Krupp³, F. Walther¹ (¹TU Dortmund, ²Hochschule Osnabrück, ³RWTH Aachen)

Einfluss des Dendritenarmabstands auf das zyklische Verformungs- und Schädigungsverhalten der Aluminiumgusslegierungen AlSi7Mg0,3 und AlSi10Mg0,3

Moderne Aluminiumgusslegierungen eignen sich aufgrund ihres hervorragenden Festigkeitzu-Masse-Verhältnisses für hochbeanspruchte Leichtbaukomponenten. Um für diese Legie-

rungen eine sichere Auslegung zu gewährleisten, muss der Zusammenhang zwischen Mikrostruktur und Ermüdungsfestigkeit bekannt sein. Hierzu wurde der Einfluss des Dendritenarmabstands auf das zyklische Spannungs-Dehnungs-Verhalten und die Ermüdungsfestigkeit der Aluminiumgusslegierungen AlSi7Mg0,3 und AlSi10Mg0,3 ermittelt. Das zyklische Verformungs- und Schädigungsverhalten wurde mittels Incremental-Step-Tests (IST) sowie Einstufenversuchen (ESV) im LCF- (low cycle fatigue) und HCF-Bereich (high cycle fatigue) charakterisiert. Unterschiede im Ermüdungsverhalten hinsichtlich Rissinitiierung und -ausbreitung wurden während des Versuchs mittels elektrischer Widerstandsmessung sowie Resonanz- und Hystereseanalyse aufgezeichnet. Durch intermittierende Bruchflächenanalyse im Computertomographen unter Last (max. 5 kN) konnten die Rissinitiierungsstellen ermittelt, mit lokalen Poren korreliert und die Bruchflächen ausgemessen werden, um die Schädigungsentwicklung (z.B. Gesamtbruchfläche, max. Bruchfläche) spezifischen Änderungen des elektrischen Widerstands, der Resonanzfrequenz und Hysterese zu zuordnen.

14:30 – 15:00

S. Gerbe (RWTH Aachen)

Mikrostrukturelle Einflüsse auf die Initiierung und das Wachstum von Ermüdungsrissen in Al-Si-Gusslegierungen unter zyklischer Beanspruchung mit hohen und sehr hohen Zyklenzahlen

Aluminiumgusslegierungen sind nicht zuletzt wegen ihres guten Festigkeit-zu-Gewicht-Verhältnisses und der guten Verarbeitbarkeit häufig die Antwort auf Leichtbaufragen im Bereich zyklisch belasteter Bauteile. Beispiele dafür stellen Teile des automobilen Antriebsstrangs dar. So werden großvolumige Bauteile wie das Zylinderkurbelgehäuse aus Al-Si-Gusslegierungen mit hohem Recyclinganteil häufig im Kernpaket-Sandgussverfahren gegossen. Bedingt durch diesen Prozess enthält das Bauteil verschiedene Ausprägungen von mikrostrukturellen Inhomogenitäten wie z.B. variierende Dendritenarmabstände, Volumendefekte und verschiedene Morphologien des Eutektikums. Der Einfluss dieser Heterogenitäten wird anhand von high-cycle- und very-high-cycle-fatigue Experimenten (HCF und VHCF) und Rissausbreitungsuntersuchungen an labormaßstäblichen Al-Si-Guss-Stufenkeilproben abgeleitet. Die Ergebnisse werden anschließend zur Abbildung der Ermüdungs-Schädigungsmechanismen in einem Materialmodell zur Kurzrisssimulation mittels Randelementemethode verwendet.

15:00 – 15:30 Kaffeepause

15:30 – 16:00

S. Schettler^{1,2}, R. Kuehne², M. Zimmermann^{1,2} (¹Technische Universität Dresden, ²Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS)

Ermüdungsverhalten von konventionell und additiv gefertigtem Maraging-Stahl

Die innovative Gruppe der additiven Prozesstechnologien bietet ein bislang unerreichtes Maß an Designfreiheit, wodurch neue Leichtbau- und Funktionsintegrationskonzepte realisierbar werden. So auch bei der Fertigung von Werkzeugen, die vorwiegend aus höherfesten Stählen - beispielsweise Maraging-Stählen - hergestellt werden. Auch wenn diese industrielle Anwendung bisher nur bedingt im Fokus der Ermüdungsforschung stand, ist ein umfassendes Verständnis der Korrelation zwischen dem Herstellungsprozess, der resultierenden Mikrostruktur und den damit verbundenen Auswirkungen auf die statischen und zyklischen mechanischen Eigenschaften von entscheidender Bedeutung. Auf den ersten Blick werden die Festigkeitseigenschaften von additiv hergestellten Werkstoffen oft als sehr vielversprechend angesehen, da Streckgrenze und Zugfestigkeit die Niveaus von Walzwerkstoffen erreichen können. Derzeit verfügbare Ermüdungsergebnisse für AM-Werkstoffe zeigen jedoch ein gänzlich anderes Bild, da das Ermüdungsverhalten durch Änderungen der Mikrostruktur wesentlich beeinflusst wird. Der zyklische thermische Eintrag und prozessbedingte Defekte, wie beispielsweise Bindefehler oder Mikroporen, dominieren den zyklischen Versagensmechanismus des Materials. Für

die zukünftige Anwendung von AM-Materialien ist es daher notwendig, ein detailliertes Verständnis der Unterschiede in den Versagensmechanismen von zyklisch belastetem, additiv gefertigtem und nachbearbeitetem Material zu erlangen.

Die durchgeführten Untersuchungen konzentrieren sich auf Ergebnisse zum Ermüdungsverhalten von 18Ni300-Maraging-Stahl (1.2709), der mit konventionellen Herstellungsverfahren und Laser Powder Bed Fusion (LPBF)-Technologie hergestellt wurde. Mit Hilfe von Ultraschallermüdungsprüfanlagen wurden Tests bis Lastspielzahlen von 10^9 Zyklen abgebildet und so der Einfluss der Fertigungshistorie auf die Ermüdungseigenschaften charakterisiert. Neben umfangreicher Bewertung der Bruchflächen wurden Gefüge dargestellt und Zugversuche durchgeführt. Mit der Summe der Ergebnisse soll gezeigt werden, wie unterschiedliche Defektarten maßgeblich die Ermüdungslebensdauer bestimmen. Die gerade im VHCF-Bereich signifikante Streuung der Versuchsergebnisse lässt sich anhand der Bruchflächenanalyse gut einordnen.

16:00 – 16:30

A. T. Zeuner^{1,2}, S. Schettler^{1,2}, Carl Huebner¹, R. Kuehne², M. Zimmermann^{1,2} (1Technische Universität Dresden, 2Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS)

Ermüdungsverhalten im Übergangsbereich zwischen HCF und VHCF von additiv gefertigtem Ti6Al4V

Die Titanlegierung Ti6Al4V eignet sich aufgrund ihrer herausragenden mechanischen und korrosiven Eigenschaften sowie der guten Schweißbarkeit aber schwierigen mechanischen Bearbeitbarkeit in besonderem Maße für die additive Fertigung (AM). Bauteile verschiedener Industriezweige wie der Luft- und Raumfahrt oder der Implantologie profitieren von der immensen Designfreiheit der AM- Prozesstechnologien.

Die sicherheitsrelevante Anwendung der Legierung setzt eine vollumfängliche Charakterisierung der zyklischen Belastbarkeit voraus. Die derzeit verfügbaren Ermüdungsergebnisse von additiv gefertigtem Ti6Al4V unterscheiden sich jedoch je nach Ausgangsmaterial, genutztem Verfahren einschließlich Fertigungsparameter, Nachbearbeitung der Oberfläche, angewandter Wärmebehandlung und weiterer Variablen deutlich. Der durch den Fertigungsprozess inhärente, thermische Zyklus und hohe Abkühlraten führen innerhalb des Bauteils in Abhängigkeit von der Geometrie zu inhomogenen Gefügezuständen. Auch bei ähnlicher bis scheinbar identischer Fertigungshistorie können so signifikante Unterschiede im Ermüdungsverhalten der Legierung auftreten. Dies ist auf die Sensitivität der Legierung auf bereits kleinste Veränderungen im Gefüge des Werkstoffes zurückzuführen. Dementsprechend sind vollumfängliche Untersuchungen, angefangen bei der Pulvercharakterisierung bis zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften, von essentieller Bedeutung, um Fertigungs-Gefüge-Eigenschafts-Beziehungen eindeutig zuordnen zu können.

Der Beitrag soll zeigen, wie eine durchgehende Charakterisierung vom Pulver bis zur anwendungsnahen Probe gestaltet werden kann. Dazu wurde eine Pulvercharakterisierung durchgeführt und Fertigungsparameter protokolliert. Anschließend wurden die mittels Laser Powder Bed Fusion (LPBF) gefertigten und spanend nachbearbeiteten Proben bei hohen Prüffrequenzen von ca. 1000 Hz bis 10^8 Lastzyklen getestet, um das Ermüdungsverhalten bis in den *Very High Cycle Fatigue* (VHCF) Bereich hinein zu untersuchen. Die Analyse der Bruchflächen zeigte den Einfluss verschiedener Defekte in Abhängigkeit von der Position im Probenvolumen. Zu deren Bewertung kam die Auswertevorschrift nach Murakami zum Einsatz. Die durch das LPBF-Verfahren eingestellten Mikrostrukturen wurden mittels metallographischer Verfahren und der *Electron Back-Scatter Diffraction* (EBSD) Technik charakterisiert.

16:30 – 17:00

A. El-Chaikh¹, B. Wollny¹, F. Appel² und H.-J. Christ¹ (1Universität Siegen, 2Helmholtz-Zentrum Geesthacht)

Ermüdungsverhalten der γ -TiAl-basierten Legierung TNB-V2 unter isothermen und thermomechanischen Bedingungen – Experimentelle Charakterisierung und mechanismenbasierte Modellierung

In recent times, γ -TiAl-based alloys have found large-scale implementation as blade material into advanced aero engines, substituting heavy-weight nickel-based alloys. In this contribution, it is shown that the high-temperature low cycle fatigue behaviour of the advanced γ -TiAl-based alloy TNB-V2 is characterized by various microstructural changes. Furthermore, the experimental scatter, resulting from slight local variations of microstructure, is rather high. The very strong effect of the total strain amplitude observed can mainly be attributed to the effect of plastic strain. For TMF loading conditions it was found that out-of-phase (OP) TMF life is significantly lower than in-phase (IP) life. The selection of a suitable life assessment concept is strongly complicated by the fact that the crack initiation stage widely controls fatigue life. Hence, concepts, which are based on fatigue crack propagation, do not have a physical justification and are therefore on principle not suitable here.

A new model was developed to predict the fatigue life of TNB-V2 uniformly for LCF and TMF conditions. In the first part of this model, the TMF hysteresis loop is simulated by means of a multi-component model using exclusively (isothermal) LCF data. In order to consider the changes in the hysteresis loops during cyclic loading, hardening and softening processes were integrated. In the second part of the model, a damage parameter was developed and applied, which includes the temperature as an important parameter and takes the effect of mean stress into account. It is shown that the concept developed can be considered as an acceptable compromise between a mechanism-based and a phenomenological approach. Using parameter values solely obtained from isothermal data, TMF life prediction calculations were carried out. The results obtained show a reasonable agreement with the experimentally observed TMF lifetimes.

Danach: individuell an den Rheinfluss und gemeinsamer Spaziergang durch die Altstadt Schaffhausen

18:30 – 19:30 ‚Nachtwächterführung‘ (Start am Restaurant Thiergarten / Schaffhausen)

19:30 Gemeinsames Abendessen im Restaurant Thiergarten (Münsterplatz 38)

Freitag, 6. März 2020

9:00 – 9:30

Steffen Scherbring (Hochschule Osnabrück)

Rissausbreitungsverhalten und Ermüdungsfestigkeit heiß-isostatisch gepresster Al-Si-Gusslegierung unter hohen und sehr hohen Zyklenzahlen.

Hersteller von Verbrennungsmotoren stehen unter dem politischen und gesellschaftlichen Druck die auftretende Schadstoffemission bei dem Betrieb von Kraftfahrzeugen weiter zu senken. Erreichbar ist dies z. B. durch besonders effiziente Leichtbaulösungen; im Automobilbau häufig mithilfe von Al-Si-Gusslegierungen umgesetzt. So findet beispielsweise die sekundäre Gusslegierung AlSi8Cu3 mit hohem Recyclinganteil unter anderem Anwendung in hoch beanspruchten großvolumigen Zylinderkurbelgehäusen. Prozessbedingt weisen solche Legierungssysteme häufig einen kritischen Defektanteil auf. Defekte wie Poren und Lunker beeinflussen die Lebensdauer sehr negativ. Mittels heiß-isostatischem Pressen werden diese Defekte verschlossen, wodurch es ermöglicht ist den Einfluss mikrostruktureller Charakteristika wie dem Dendritenarmabstand [DAS] und der Morphologie des eutektischen Siliziums auf die Ermüdungseigenschaften differenzierter zu betrachten. Zu diesem Zweck sind Untersuchungen im High-Cycle- und Very-High-Cycle-Fatigue Bereich (HCF, VHCF), sowie Rissausbreitungsexperimente an HIP-behandelten Proben der Legierung AlSi8Cu3 durchgeführt worden. Ausgewählte HCF-Proben wurden dabei *in-situ* mittels Digitalmikroskop beobachtet.

9:30 – 10:00

M.W. Klein, M. Smaga, T. Beck (TU Kaiserslautern)

Wechselverformungsverhalten von hochmanganhaltigem TWIP-Stahl unter Berücksichtigung verschiedener Oberflächenmorphologien

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit dem Einfluss der Oberflächenmorphologie auf das zyklische Verformungsverhalten im HCF Bereich des hochmanganhaltigen austenitischen HSD®600 TWIP-Stahls mit Mn-Al-Si Legierungskonzept. Die Ermüdungsversuche wurden an Proben mit drei unterschiedlichen Oberflächenmorphologien (i) nach Polieren, (ii) nach Gleichlaufräsen und (iii) nach Gegenlaufräsen in einachsigen Zug-Druck-Ermüdungsversuchen durchgeführt. Die Oberflächenmorphologien variieren signifikant in Topographie, Mikrostruktur sowie ihrem Eigenspannungszustand. Es zeigt sich ein massiver Einfluss der Oberflächenmorphologie auf das Verformungs- und Lebensdauerverhalten. Zur Erklärung des genannten Einflusses werden mit raster- und ionenmikroskopischen Methoden die oberflächennahen Mikrostrukturen vor der Ermüdung und die ermüdungsinduzierten Änderungen der Oberflächenmorphologien bis zur Nanoskala charakterisiert und vorgestellt.

10:00 – 10:30

Florian Schäfer, Sebastian Geyer (Universität des Saarlandes)

Wasserstoffeinfluss auf die PSB-Bildung bei Ermüdung von Reineisen

Wasserstoffversprödung ist ein zwar bereits sehr langes bekanntes Problem, insbesondere beim Einsatz hochfester Stählen, dennoch ist der Effekt von Wasserstoff auf das Materialverhalten auch heute noch eine Herausforderung vor allem im Bereich der Materialermüdung. Die bisherige Strategie der sicherheitsbedingten Überdimensionierung muss im Sinne nachhaltigen Werkstoffeinsatzes kritisch geprüft werden. Ein vertieftes Verständnis derjenigen Mechanismen, die der Wasserstoffversprödung zugrunde liegen, ist unabdingbar. Stabilisierende und rissfördernde Wasserstoffeffekte überlagern sich im Material und sind nur sehr schwer zu trennen. Mit dem Ziel, den Einfluss von Wasserstoff auf die Rissinitiierung zu untersuchen, wurde technisch reines Eisen *in situ* während eines Ermüdungsversuches mit konstanter Wegamplitude beladen. Die Entwicklung von In- und Extrusionen als Hauptrissinitiierungsorte wurde mittels Rasterkraftmikroskopie *quasi in situ* beobachtet. Es konnte so gezeigt werden, dass Wasserstoff Dehnung stärker lokalisiert (HELP-Mechanismus), diese lokalisierte Dehnung jedoch ebenfalls schwächer ausgeprägt ist, so dass die Lebensdauer erhöht zu sein scheint.

10:30 – 11:00 Kaffeepause**11:00 – 11:30**

Christoph Ripplinger (RWTH Aachen)

Alternativer Ansatz zur Bestimmung der werkstoffmechanischen Stützwirkung in Gusseisen mit Kugelgraphit

In der FKM-Richtlinie zur Auslegung von Bauteilen aus Stahl- und Aluminiumwerkstoffen wird der Einfluss von Kerben auf die Langzeitfestigkeit berücksichtigt. Dazu werden neben der Kerbwirkungs- und Kerbformzahl auch plastische und werkstoffmechanische Stützzahlen bestimmt. Diese Stützzahlen basieren auf Mechanismen wie der statistischen Stützwirkung oder der Makrostützwirkung nach Neuber. Damit Anwender die notwendigen Berechnungen zur Auslegung ihrer Bauteile ohne umfangreiche analytische und experimentelle Untersuchungen durchführen können werden die benötigten Parameter tabellarisch angegeben. Viele dieser Parameter beruhen auf Annahmen, die modernen Gusseisenwerkstoffen mit Kugelgraphit nicht gerecht werden. Daher wird ein alternatives Konzept zur Berechnung dieser Stützzahlen vorgestellt und mit dem etablierten Konzept verglichen.

11:30 – 12:00Thomas Wegener (Universität Kassel)*Einfluss von χ -Karbidausscheidungen auf das Ermüdungsverhalten eines hochmanganhaltigen, dichter reduzierten Leichtbaustahls*

In der vorliegenden Studie wurde die Mikrostruktur sowie das Verhalten unter monotoner und insbesondere zyklischer Last des hochmanganhaltigen, dichter reduzierten Leichtbaustahls Fe-29.8Mn-7.65Al-1.11C untersucht. Dabei wurden zwei verschiedene Zustände miteinander verglichen: ein lösungsgeglühter und ein ausscheidungsgehärteter Zustand. Die Ergebnisse zeigen eine homogene Mikrostruktur mit einem hohen Anteil an Rekristallisationszwillingen für beide Zustände, welche sich im Hinblick auf die Korngröße und den Korngrenzcharakter nicht unterscheiden. Durch Synchrotonmessungen konnte ein Nachweis für das Vorhandensein von χ -Karbiden im ausscheidungsgehärteten Zustand erzielt werden. Diese Ausscheidungsteilchen resultieren in einer signifikanten Steigerung der Streckgrenze und Zugfestigkeit im Vergleich zum lösungsgeglühten Zustand. Auch die Ergebnisse dehnungsgeregelter Ermüdungsversuche zeigen ein unterschiedliches Verhalten der beiden Zustände. Während das Wechselverformungsverhalten des lösungsgeglühten Zustands auf allen Dehnungsniveaus nach kurzer anfänglicher Entfestigung durch ein stabiles Spannungsplateau gekennzeichnet ist, kann ein ähnliches Verhalten für den Zustand mit χ -Karbiden nur bei der geringsten Dehnungsamplitude beobachtet werden. Mit zunehmender Dehnungsamplitude ist das Wechselverformungsverhalten des ausscheidungsgehärteten Zustandes durch eine stetige Entfestigung charakterisiert, die in geringeren Lebensdauern im Vergleich zum lösungsgeglühten Zustand resultiert. Die Ermüdungsergebnisse werden auf Basis von Spannungs-Dehnungs-Hysteresen sowie post mortem Synchrotonmessungen kritisch diskutiert.

12:00 – 12:30Klaus Stärk*Bauteilprüfung auf dem Resonanzpulser*

Resonanzpulser bieten wirtschaftliche Lösungen bei Ermüdungsprüfungen für Qualitätssicherung und Entwicklung. Außer der Prüfung von einfachen Probengeometrien ermöglicht die Resonanzprüfmaschine aber auch zahlreiche Möglichkeiten für komplexere Bauteile, wenn man alle Vorteile der Resonanzpulser ausnutzt und die Grenzen kennt. Die Analyse der Resonanzfrequenz und der Leistung lassen sich hervorragend als Kriterien für Bauteilveränderungen inklusive Anriss verwenden. Es werden Beispiele von Bauteilprüfungen unter Biegung, Torsion und bei Verschleißproblemen auf diversen Resonanzprüfmaschinen gezeigt.

12:30 – 12:45

U. Krupp, G. Biallas: Abschluss; nächste Sitzung

Imbiss