

6. Dez. 1988

Diss. ETH Nr. 8714

**Einfluss der Mikrostruktur auf das Ermüdungsverhalten
einiger Leichtmetallwerkstoffe
in verschiedenen Umgebungen**

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels eines
Doktors der technischen Wissenschaften
der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

vorgelegt von

JIANG-HONG ZHENG

Dipl. Ing. (Univ.) der Werkstoffwissenschaften
Huazhong University of Science and Technology, VR China

geboren am 8. Juli 1957
von Volksrepublik China

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. M. O. Speidel, Referent
Prof. Dr. H. Böhni, Korreferent

ADAG Administration & Druck AG

Zürich 1988



ZUSAMMENFASSUNG

Die **Ermüdung** ist die häufigste Ursache für das Versagen von Bauteilen unter schwingenden Beanspruchungsbedingungen. Eine wichtige Aufgabe der heutigen Werkstoff-Forschung ist die Verbesserung des Ermüdungsverhaltens eines im Betrieb eingesetzten Werkstoffs. Nur durch eine genaue Kennzeichnung des Ermüdungsprozesses und mit dem Verständnis der Mechanismen und ihrer Einflussgrößen ist daraus folgend eine Optimierung des Gefüges möglich.

Die Absicht der vorliegenden Arbeit bestand darin, **umfassende Kenntnisse** über die wesentlichen Einflussgrößen auf die mechanischen Eigenschaften, insbesondere das Ermüdungsverhalten, in Leichtmetallwerkstoffen zu erlangen, den **Zusammenhang** zwischen den makroskopischen mechanischen Eigenschaften und den mikroskopischen Gefügebestandteilen zu finden und die **Korrelation** zwischen Rissbildungs- bzw. Rissausbreitungsverhalten und makroskopisch messbaren Parametern qualitativ und quantitativ zu beschreiben, um das Verhalten des Werkstoffs bei monotoner und schwingender Beanspruchung vorhersagen und die Schädigungsakkumulation im Werkstoff beschreiben zu können.

Die Untersuchungen dieser Arbeit wurden an einer **Al-Knetlegierung Al 2024** detailliert und an einer **Al-Gusslegierung AlCu5TiMn**, einer **Mg-Gusslegierung AZ91XD** und **technisch reinem Magnesium** ergänzend in verschiedenen Umgebungen (Vakuum, Luft, Wasser und NaCl-Lösung) und verschiedenen Versuchsbedingungen (Mittelspannung, Frequenz, usw.) durchgeführt. Traditionelle und moderne bruchmechanische Prüfmethoden sowie Raster- und Durchstrahlungselektronenmikroskop wurden in den Untersuchungen angewandt.

Der Vorgang der Ermüdung in metallischen Werkstoffen kann in die Bereiche **Rissbildung**, stabile (unterkritische) **Rissausbreitung** und den **Restbruch** (instabile Rissausbreitung) unterteilt werden.

Die Ergebnisse aus dem Zug- und Bruchzähigkeitsversuch zeigen, dass das **Gewaltbruchverhalten** eines Werkstoffes in erster Linie von der Zusammensetzung und der Mikrostruktur abhängt. Die Mikrostruktur und das entsprechenden Verformungsverhalten der Leichtmetallwerkstoffe können durch Zusatzelemente, Kalt- und Wärmebehandlungen in weiten Grenzen verändert werden. Intermetallische Einschlüsse, Aus-

scheidungen, Korngrösse und ausscheidungsfreie Zonen sowie andere Gefügefehler sind dabei wichtige mikrostrukturelle Einflussgrössen. Ein **Rechenmodell**, mit dem die Bruchzähigkeit K_{IC} mit anderen einfacher zu ermittelnder Grundeigenschaften (z.B. Streckgrenze R_p , Verfestigungsexponent n und Elastizitätsmodul E) und mikrostrukturellen Grössen (z.B. Teilchenabstand und kritische Dehnung) dargestellt wird, wird ebenfalls in der vorliegenden Arbeit diskutiert.

Die **Ermüdungsrissbildung** ist ein lokales Ereignis, das auf inhomogenes Werkstoffverhalten zurückzuführen ist. In der Legierung Al 2024 führt die besondere inhomogene Gleitverteilung im Korninneren beim unteralterten Zustand T4 und an ausscheidungsfreien Zonen entlang Korngrenzen beim überalterten Zustand T7 zu früher Rissbildung. Die experimentellen Ergebnisse zeigen **vier Mikromechanismen für die Rissbildung**: 1) an intermetallischen Einschlüssen; 2) an Gleitbändern, besonders beim unteralterten Zustand; 3) an Korngrenzen, besonders beim überalterten Zustand; 4) an Gefügefehlern, besonders in Gusslegierungen. Fast 50% der Anrisse in der Legierung Al 2024 treten an Einschlüssen auf; dies hängt nicht vom Spannungsausschlag und der Lastspielzahl ab. Der Anteil der Gleitbandrisse nimmt mit zunehmendem Spannungsausschlag zu. Je höhere statische Festigkeit der Werkstoff hat, desto höher ist seine Schwingdauerfestigkeit in inerten Umgebungen. Korrosive Umgebungen erleichtern der Rissbildung infolge von Lochfrasskorrosion, anodischer Auflösung, Wasserstoffversprödung, wiederholtem Deckschichtbruch sowie irreversibler Gleitung. Ein besonders deutlicher Einfluss der Umgebung auf die Dauerfestigkeit tritt beim unteralterten und maximal ausgehärteten Zustand in der Legierung Al 2024 auf. Folgende Tendenz wurde gezeigt: Je heterogener das Gefüge des Werkstoffes ist, umso schlechter ist das Korrosionsermüdungsverhalten. Die Mg-Legierungen sind empfindlicher auf Korrosionsermüdung als Reinformmagnesium. Für ein gutes Korrosionsermüdungsverhalten muss ein Werkstoff nicht nur eine hohe Festigkeit, sondern auch eine gute Korrosionsbeständigkeit besitzen. In dieser Arbeit wurde ein neuer Begriff -**"Rissbildungsgeschwindigkeit"**- vorgeschlagen; auf dessen Basis wird es möglich, die Schädigungsakkumulation qualitativ und Schadenvorhersagen quantitativ zu beschreiben.

Für **Ermüdungsrissausbreitung** wurden **drei Mikromechanismen** diskutiert, nämlich Facett-, Riefen- und Grübchenmechanismus. Im Schwellbereich ist die Rissausbreitungsgeschwindigkeit sehr von der Mikrostruktur abhängig. Die Versuchsergebnisse für die Legierung Al 2024 deuten darauf hin, dass aufgrund rauherer Bruchflächen beim

unteralterten Zustand ein stärkeres Rissverschluss als bei anderen Zuständen eintritt und dies zu einem höheren Schwellwert ΔK_0 beim unteralterten Zustand führt. Es ist möglich, dass die interkristalline Rissausbreitung an ausscheidungsfreien Zonen beim überalterten Zustand sogar in Vakuum zur Herabsetzung des Schwellwertes und zur Erhöhung der Geschwindigkeit der Ermüdungsrissausbreitung beiträgt. Der Schwellwert ΔK_0 nimmt mit zunehmender Korngrösse und abnehmendem Spannungsverhältnis R zu. Der Riefenmechanismus, der im mittleren ΔK -Bereich eine überwiegende Rolle spielt, ist wenig empfindlich auf Mikrostruktur, Spannungsverhältnis und Belastungsfrequenz f sowie Umgebung im Gegensatz zur makroskopischen Rissausbreitungsgeschwindigkeit $\Delta a/\Delta N$. Rissablenkung und -verzweigung sind in der Rissausbreitungsphase von grosser Bedeutung und ihr Auftreten ist immer mit dem inhomogenen Verformungsverhalten des Werkstoffes und der Auswirkung des korrosiven Mediums verbunden. Die Ergebnisse zeigen, dass ein positiver Einfluss der Umgebung auf das Schwellverhalten der Legierung Al 2024 auf eine sogenannte "oxidinduzierte" Rissverschluss zurückzuführen sein kann. Allgemein haben die korrosiven Medien einen negativen Einfluss auf das Rissausbreitungsverhalten, besonders im Bereich II bei hoher Mittelspannung und niedriger Frequenz. Die Frequenzabhängigkeit der Rissausbreitungsgeschwindigkeit der Legierung Al 2024 bei Korrosionsermüdung ist auf die Überlagerung von Spannungsrissskorrosion (SRK) und Ermüdungsrissausbreitung zurückzuführen. **Die Mechanismen für die Rissausbreitung bei Korrosionsermüdung**, besonders Oxidation und Wasserstoffversprödung, wurden erläutert.

Ein **Überlagerungsmodell** für Ermüdungsrissausbreitung wurde auf der Basis der Mikromechanismen vorgeschlagen, das recht gut mit den experimentellen Daten der $\Delta a/\Delta K-\Delta N$ -Kurve übereinstimmt.

ABSTRACT

The purpose of the present work was both to obtain a **fundamental knowledge** on the major parameters influencing the mechanical properties of metallic materials, in particular the fatigue behavior, and to investigate the **relationship** between the macroscopical properties and microstructure. In order to appraise the material's fracture behavior, to calculate damage accumulation in a material and to predict the residual life time of a component during fatigue, the **mechanisms** of fracture both under static and under cyclic load and the **correlation** between the fracture toughness, the fatigue crack initiation or propagation behavior and macroscopical measurable parameters have been described qualitatively and quantitatively.

Experimental investigations in this work were carried out on several light metallic materials (**2024 aluminum alloy, AlCuTiMn cast alloy, AZ91XD cast alloy and 99.8% Mg**), not only in different aged or cold worked conditions, but also under several test conditions (mean stresses, frequencies and environments).

The experimental results show that the fracture behavior and fatigue behavior of light metallic materials are influenced first of all by their microstructure. The fracture mechanism in the age hardening Al-alloys always shows a ductile dimple fracture. The underaged condition shows more inhomogeneous slip behavior since coherent precipitates are sheared by dislocations resulting in planar slip, whereas more inhomogeneous deformation at grain boundaries has been observed in overaged tempering due to the obvious existence of precipitate-free zones (PFZ) adjacent to grain boundaries.

The **fracture toughness**, K_{IC} , can be expressed by an **equation** containing other fundamental properties (e.g. yield strength, elastic modulus and hardening exponent) and microscopical parameters (e.g. particle distance and critical elongation).

The **fatigue crack initiation** is a local event which traces back to the inhomogeneous deformation in material. The **micromechanism for the crack initiation** has been extensively studied in aluminum alloys. About 50% of microcracks in all aged conditions of Al 2024 alloy initiate at large inclusions. More microcracks along slip bands occur in underaged condition than in others, whereas a larger portion of cracks

which initiate at grain boundaries have been found in the overaged condition. In the case of aluminum cast alloy, cracks prefer to form at defects of microstructure (e.g. cavities, pores). Crack initiation during fatigue is promoted by corrosive environments as a result of pitting, anodic solution, hydrogen embrittlement, repeated film rupture, irreversible slip and so on. The under- and peak-aged condition in Al 2024 alloy are more sensitive to corrosion fatigue than the overaged temper, thus alloys are more sensitive than pure metal. The experimental results support the assumption that the fatigue endurance limit of a material depends mainly on its tensile strength, but for a superior resistance to corrosion fatigue a material must possess not only a high strength but also a good corrosion resistance. In this work a new concept –“**fatigue crack initiation rate**”– was proposed and on its basis it is possible both to qualitatively describe the damage accumulation during fatigue and to quantitatively predict the rest life.

The **fatigue crack propagation** is determined essentially by the cyclic plastic deformation at the crack tip which is controlled again by the stress intensity range ΔK . **Three kinds of micromechanism for fatigue crack propagation** – facet, striation and dimple mechanism – were discussed. The near-threshold crack propagation behavior is very dependent on microstructure. In contrast to the adverse effect on crack initiation, inhomogeneous slip behavior can improve fatigue crack propagation behavior. The results for Al 2024 alloy have shown that a more intensive roughness-induced closure effect and a higher threshold ΔK_0 will occur in the underaged condition compared to the other conditions. It is possible that intercrystalline crack propagation is caused by PFZ, even in vacuum. It leads both to degradation of ΔK_0 and to elevation of fatigue crack propagation rate $\Delta a/\Delta N$, especially in the overaged temper. In general, the threshold ΔK_0 increases with increasing grain size and decreasing stress ratio. The striation mechanism which plays a dominant role in the middle ΔK range is not very sensitive to microstructure, stress ratio, frequency and environment in contrast to the macroscopical rate $\Delta a/\Delta N$. The crack deflection and branching whose appearance always links to the inhomogeneous deformation in the material and the effect of a corrosive environment are very significant for the crack propagation behavior. A positive effect of the environment on threshold behavior in Al 2024 alloy has been revealed and this has been related to the so-called “oxide-induced closure”. The corrosive environments have mostly a negative effect on the crack propagation behavior, particularly in the intermediate ΔK range with a high stress ratio and a low frequency. The

dependence of the corrosion fatigue behavior of Al 2024 alloy on frequency has been identified. It can be related to the superposition of stress corrosion cracking and fatigue. **The important mechanisms for corrosion fatigue crack propagation** in light metals were interpreted as oxidization and hydrogen embrittlement.

A **new superposition model** for fatigue crack propagation has been suggested on the basis of the three micromechanisms. This model corresponds very well to the experimental data.