

LEBENSDAUERVORHERSAGE VON ZWEIACHSIG BEANSPRUCHTEN KREUZPROBEN DER NICKELBASIS- LEGIERUNG UDIMET720Li BEI ERHÖHTEN TEMPERATUREN

Hartmut Schlums, Wolfgang Rothkegel, Áron Varga*, Andreas Thomas**

Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG, Dahlewitz

*) Dept. of Material Science and Metallurgy, University of Cambridge, UK

***) Siempelkamp Prüf- und Gutachter-Gesellschaft mbH, Dresden

Zusammenfassung: Zuverlässige Lebensdauervorhersagemethoden von Flugtriebwerkskomponenten wie Turbinenscheiben sollten das mehrachsige Ermüdungsverhalten unter erhöhten Einsatztemperaturen adäquat berücksichtigen. Zur Untersuchung des zweiachsigen Ermüdungsverhaltens der Scheibenlegierung Udimet720Li wurden Kreuzprobenversuche durchgeführt. Diese Versuche wurden mit der Finite-Elemente Methode unter Berücksichtigung des inelastischen Werkstoffverhaltens analysiert. Für die Anrisslebensdauervorhersage nach dem örtlichen Konzept wird ein äquivalenter Dehnungsparameter vorgeschlagen, die Rissfortschrittslebensdauer wurde mit Hilfe der bekannten Paris-Gleichung ermittelt. Die resultierende Gesamtlebensdauer wird mit den experimentellen Ergebnissen verglichen und diskutiert.

Stichwörter: Ermüdung, Kriechen, Mehrachsigkeit, Kreuzproben, Lebensdauervorhersage

LIFETIME PREDICTION OF BIAXIALLY LOADED CRUCIFORM SPECIMENS OF THE NICKEL BASE ALLOY UDIMET720Li AT ELEVATED TEMPERATURES

Abstract: Viable lifetime prediction methods for aero engine components such as turbine discs should be able to adequately cover the multiaxial fatigue behaviour under elevated in-service temperatures. In order to investigate the biaxial fatigue behaviour of the disc alloy Udimet720Li, appropriate cruciform specimen tests were performed. The tests were studied using finite element analyses under consideration of the inelastic material behaviour. For the lifetime prediction to crack initiation, an equivalent strain parameter is proposed on the basis of the local concept. The crack propagation life was assessed utilising the widely-known Paris law. The resulting total lifetime will be compared with the experimental results and discussed.

Keywords: fatigue, creep, multiaxiality, cruciform specimens, lifetime prediction

Einleitung

Validierte Lebensdauervorhersagemethoden sind wesentlicher Bestandteil des Auslegungsprozesses zuverlässiger, effizienter und wettbewerbsfähiger Flugtriebwerkskomponenten. Verbesserte Lebensdauererfahren zielen auf eine optimierte Werkstoffausnutzung ab, ohne die Sicherheits- und Zuverlässigkeitsstandards der betreffenden Komponenten zu beeinträchtigen. Turbinenscheiben sind im Allgemeinen komplexen thermo-mechanischen Betriebsbeanspruchungen ausgesetzt. Aufgrund der sich einstellenden Umfangs- und Radialspannungsverteilungen sind lebensdauerkritische Bereiche wie beispielsweise die Scheibenmembran zweiachsigen Spannungszuständen ausgesetzt. Zuverlässige Auslegungsmethoden sollten daher das Deformations- und Schädigungsverhalten des Scheibenwerkstoffes bei mehrachsiger Ermüdungsbeanspruchung und erhöhten Einsatztemperaturen adäquat berücksichtigen.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit war die Untersuchung des Ermüdungsverhaltens für den Scheibenwerkstoff Udimet720Li unter zweiachsigen Beanspruchungsbedingungen und erhöhten Temperaturen. Hierzu wurde ein umfangreiches Testprogramm aus Kreuzprobenversuchen durchgeführt. Sämtliche Versuche wurden mittels Finite-Elemente Methode analysiert und die Ergebnisse der Lebensdauervorhersagen mit den experimentellen Ergebnissen verglichen. Im folgenden Abschnitt soll zunächst der Werkstoff und das Testprogramm beschrieben werden.

Werkstoff und Testprogramm

Mit der Nickelbasisgusslegierung Udimet720Li wurde ein Werkstoff untersucht, der im Flugtriebwerksbereich in gegossener und geschmiedeter Form für Turbinenscheiben eingesetzt wird. Die chemische Zusammensetzung dieser oxidations- und korrosionsbeständigen Legierung, die Materialherstellung und der Wärmebehandlungsprozess sind bei Rumi [1] beschrieben.

In den vergangenen Jahren wurden zahlreiche Laborprobenversuche zur Charakterisierung des einachsigen Zug- und Kriechverhaltens sowie des zyklischen Ermüdungsverhaltens von Udimet720Li durchgeführt (siehe König [2]). Zur Untersuchung des Kriech- und Ermüdungsverhaltens unter zweiachsigen Belastungsbedingungen wurde ein Kreuzprobenprüfstand konzipiert und aufgebaut, der in Bild 1 dargestellt ist. Die senkrecht zueinander orientierten Belastungsachsen des aufrecht stehenden Prüfstandes sind in einen massiven achteckigen Rahmen integriert. Prüfzylinder in jeder Achse ermöglichen lastkontrollierte Versuche, eine Justiervorrichtung erlaubt die zentrale Positionierung der Kreuzprobe. Diese wird gemeinsam mit den Verbindungsadaptern einer durch zwei getrennte Regelkreise generierten Heizstrahlung ausgesetzt. Hierbei konnte die Temperaturschwankung auf weniger als 1 °C begrenzt werden. Die Lasteinleitung ließ sich aufgrund der speziellen Anbindung über sphärische Lager weitgehend biegemomentenfrei realisieren. Die in Bild 2 dargestellte Kreuzprobe weist zwecks Konzentration der Spannungen und Dehnungen im Zentrum ein kreisförmiges Testgebiet reduzierter Dicke von 0.8mm auf.

Die eingestellten Belastungen der Kreuzprobenversuche orientieren sich an den für Membranbereiche von Turbinenscheiben charakteristischen Beanspruchungsverhältnissen. Das Testprogramm umfasste insgesamt 36 zyklische Ermüdungs-

versuche bzw. Low-Cycle-Fatigue (LCF-)Versuche bei 3 verschiedenen Temperaturen (650 °C, 675 °C, 700 °C) mit proportional zueinander pulsierenden Lasten in den beiden Probenachsen. 19 Versuche wurden unter *equi-biaxialen* Belastungen, d.h. mit identischen, zueinander pulsierenden Lasten in jeder Probenachse gefahren, die übrigen 17 LCF-Versuche wurden unter biaxialen Belastungen bei verschiedenen Lastverhältnissen (0.25, 0.5, 0.75) in den beiden Achsen gefahren. Bei allen LCF-Versuchen betrug das Verhältnis zwischen maximaler und minimaler Testlast in jeder Achse 0.1. Bild 4 zeigt den Testzyklus zu den LCF-Versuchen, wobei 2 verschiedene Haltezeiten (1 und 120 Sekunden) realisiert wurden.

Finite-Elemente Analyse der Kreuzprobenversuche

Die Kreuzproben wurden mit Hilfe eines Rolls-Royce internen Finite-Element (FE) Programms analysiert. Das FE-Modell ist in Bild 3 dargestellt und umfaßt 5984 20-Knoten Quader-Elemente. Der numerische Aufwand konnte unter Ausnutzung der drei Symmetrieebenen signifikant reduziert werden, so dass nur ein Achtelmodell zu analysieren war (siehe Bild 3). Die FE-Analyse erfolgte auf der Basis linearer Überlagerung von zeitunabhängiger Plastizität und zeitabhängigem Kriechen. Zur Beschreibung des plastischen Verhaltens wurde das bewährte Fließflächenmodell nach Mróz ([3], [4]) angewandt. Dieses Werkstoffmodell ermöglicht die Beschreibung kinematischer Verfestigung und der für zyklische Vorgänge charakteristischen Phänomene wie den Bauschinger Effekt auf der Basis einer definierten Reihe von Fließflächen konstanter Verfestigungsmoduli im Spannungsraum. Allgemein haben zyklische Plastizitätsmodelle, die kinematische Verfestigungsansätze nach Mróz beeinhaltend, gute Übereinstimmungen mit experimentellen Ergebnissen aus mehrachsigen Versuchsführungen ergeben (vgl. Socie [5]).

Das Kriechverhalten wurde auf der Grundlage eines empirisch basierten hyperbolischen Kriechgesetzes simuliert, welches an einachsige Kriechversuchsdaten einschließlich Kriechbruchdaten von Udimet720Li angepasst wurde und die charakteristischen Kriechstadien einschließlich des tertiären Bereichs abbildet. Dieser Prozeß wurde von Williams [6] entwickelt und in das erwähnte FE-Programm implementiert. Innerhalb der FE-Analyse ergeben sich die inelastischen Dehnungen aus der Überlagerung von plastischen Dehnungen und Kriechdehnungen.

Bei der FE-Analyse der Kreuzprobenversuche unter LCF-Testbedingungen wurde ein Vorgehen verfolgt, bei dem die einzelnen Testzyklen in sogenannte *äquivalente Zyklen* zusammengefaßt wurden. Dieses Vorgehen ist schematisch in Bild 5 für den Fall einer Haltezeit von 1 Sekunde dargestellt. Der erste *äquivalente Zyklus* repräsentiert exakt den eigentlichen Testzyklus mit der maßgebenden Belastungsrate und den entsprechenden Haltezeiten (hier 1s) bei maximalem und minimalem Belastungsniveau. Der zweite *äquivalente Zyklus* simuliert die nächsten drei Testzyklen mit entsprechend vergrößerter oberer und unterer Haltezeit (hier 3s), um den Einfluß der während der Haltezeit ablaufenden Kriechrelaxation zu berücksichtigen. Der dritte *äquivalente Zyklus* simuliert dann die nachfolgenden 10 Testzyklen mit den entsprechenden zehnfachen Haltezeiten (vgl. Bild 5). Die beschriebene Vorgehensweise reduziert somit den numerischen Aufwand für die Simulation des zyklischen Verhaltens bis zum Erreichen des zyklisch stabilisierten Spannungs-Dehnungszustandes im Testgebiet der Probe. So genügt bei den FE-Simulationen

die Vorgabe von 6 äquivalenten Zyklen entsprechend 444 Testzyklen, um ein quasi-stabilisiertes zyklisches Verhalten der Kreuzprobe im Testgebiet zu erreichen.

Bild 6 zeigt die Verteilung der von-Mises Vergleichsspannung am Beispiel einer *equi-biaxial* beanspruchten Kreuzprobe. Der Zeitpunkt der dargestellten von-Mises Vergleichsspannung bezieht sich hierbei auf den Beginn der oberen Haltezeit (hier 120s) für den sechsten äquivalenten Zyklus. Im Zuge der mit dem inelastischen Verhalten verbundenen Spannungsumlagerungen stellt sich das Maximum der von-Mises Spannung leicht dezentral im Innern des Testgebietes, auf der Winkelhalbierenden zwischen den beiden Belastungsrichtungen ein. Der Ort der maximalen von-Mises Spannung liegt somit in unmittelbarer Nähe zum Ort der Rissinitiierung, wenige Millimeter vom Zentrum der Kreuzprobe entfernt, wie in Bild 7 dargestellt.

Im Fall *biaxialer* Kreuzprobentests mit Lastverhältnissen zwischen den Probenachsen von kleiner 1 bildete sich der Anriss nahe dem Probenzentrum auf der Achse maximaler Belastung aus. Der Rissfortschritt dieser Proben erfolgte generell senkrecht zur Richtung maximaler Beanspruchung wie es in Bild 8 am Beispiel einer getesteten *biaxialen* Probe mit dem Lastverhältnis 0.5 veranschaulicht ist. Eine zunehmende Abweichung vom *equi-biaxialen* Lastfall resultierte in einer signifikanten Reduktion der gesamten Lebensdauer. Die LCF-Kreuzprobentests mit einer längeren Haltezeit von 120 Sekunden ergaben zyklische Lebensdauern, die im Allgemeinen um einen Faktor 2 kleiner waren als für die Probentests mit der kurzen Haltezeit von 1 Sekunde.

Lebensdauervorhersagen der Kreuzprobenversuche

Ziel war die Untersuchung von Lebensdauervorhersagemethoden anhand der Kreuzprobenversuche unter Berücksichtigung des Anriss- und Rissfortschrittsverhaltens. Von besonderem Interesse war hierbei die Fragestellung, ob sich die Einflüsse unterschiedlicher Versuchsparameter wie Temperatur, Haltezeit und Belastungsverhältnisse auf die Lebensdauervorhersage erfassen lassen. Im Folgenden werden die angewandten Methoden zur Lebensdauervorhersage kurz vorgestellt und abschließend die Ergebnisse diskutiert.

Anrisslebensdauervorhersage

Zur Vorhersage der zyklischen Ermüdungslebensdauer N_f bis Anriss wurde dem allgemein bekannten *örtlichen Konzept* (vgl. Radaj [7]) entsprechend ein *äquivalenter Dehnungsparameter* ε_e verwendet, der sich gemäß Gleichung (1) aus der maximalen Hauptnormalspannung σ_{max} , der gesamten Dehnungsschwingbreite $\Delta\varepsilon$, dem Elastizitätsmodul E und einem werkstoffabhängigen Parameter w zusammensetzt.

$$\varepsilon_e = \left\{ \frac{\sigma_{max}}{E} \right\}^{1-w} \Delta\varepsilon^w \quad (1)$$

Dieser Parameter geht für den Fall $w = 0.5$ in den bekannten Smith-Watson-Topper (SWT)-Parameter [8] über. Bei der Anwendung auf mehrachsige Beanspruchungsfälle setzt sich der SWT-Parameter gewöhnlich aus der Dehnungsschwingbreite und der maximalen Spannung zusammen, die sich aus der zu ermittelnden kritischen Ebene maximaler Dehnungsschwingbreite ergeben [8]. Die maßgebenden Spannungs- und Dehnungswerte in Gleichung (1) basieren auf dem zyklisch stabilisierten Zustand. Der *äquivalente Dehnungsparameter* ε_e wurde zuvor an eine

Vielzahl verschiedener einachsiger dehnungs- und lastkontrollierter LCF-Versuche an Udimet720Li angepasst, die einen weiten Temperaturbereich bis zu 700°C abdeckten. Für diesen Anpassungsprozess wurde die Lebensdauerkorrelation nach Gleichung (2)

$$N_f = N_o \left\{ \frac{\varepsilon_e + U_N}{\varepsilon_e - U_N} \right\}^{\frac{1}{2A}} \quad (2)$$

verwendet, welche die äquivalente Dehnung ε_e mit der zyklischen Ermüdungslebensdauer N_f korreliert. Hierbei bezeichnen N_o , U_N and A werkstoffabhängige Parameter, die im Rahmen des Anpassungsprozesses bestimmt wurden.

Für die Ermittlung der Ermüdungsschädigung wurden die Spannungen und Dehnungen in jedem äquivalenten Zyklus (vgl. Bild 5) nach Gleichung (1) bestimmt. Die Identifikation der jeweils maßgebenden Richtungen mit den maximalen Werten des *äquivalenten Dehnungsparameters* ε_e und den zugehörigen minimalen zyklischen Lebensdauern erfolgte im Rahmen der FE-Analyse auf der Basis des *Konzeptes der kritischen Ebene* [8]. Aus den so ermittelten Ermüdungsbeiträgen der einzelnen äquivalenten Zyklen ergibt sich für jeden Punkt der analysierten Kreuzprobe die gesamte Ermüdungsschädigung bzw. Anrisslebensdauer. Analog ergibt sich die Kriechschädigung auf der Basis der für jeden äquivalenten Zyklus ermittelten akkumulierten (Vergleichs-)Kriechdehnung unter Berücksichtigung der jeweiligen Haltezeit (hier 1s oder 120s) des LCF-Kreuzprobenversuchs. Für die jeweils vorliegenden Spannungen und Temperaturen erfolgte die Zuordnung zur Kriechbruchzeit unter Verwendung des erwähnten hyperbolischen Kriechgesetzes. Die so ermittelten Ermüdungs- und Kriechschädigungsanteile werden über alle simulierten äquivalenten Zyklen zu einer Gesamtschädigung addiert. Für den Wert 1 ergibt sich die *kombinierte zyklische Lebensdauer* bzw. *Anrisslebensdauer* N_{AR} nach Gleichung (3):

$$N_{AR} = \left\{ \sum_{i=1}^{i=K} \left(\frac{1}{N_{fi}} + \frac{t_H}{t_{KB,i}} \right) \right\}^{-1} \quad (3)$$

Hierbei bezeichnet N_{fi} die Ermüdungslebensdauer, die sich für die analysierten Spannungen und Dehnungen des jeweiligen (i -ten) äquivalenten Zyklus' nach Gleichung (2) ergibt. K ist die Gesamtzahl (hier 6) der simulierten äquivalenten Zyklen, t_H bezeichnet die jeweils maßgebende Haltezeit, also 1s oder 120s. Die Kriechbruchzeit $t_{KB,i}$ wurde für jeden äquivalenten Zyklus aus den ermittelten Spannungen und Dehnungen mittels des hyperbolischen Kriechgesetzes bestimmt. Die kombinierte zyklische Lebensdauer nach Gleichung (3) wurde im Rahmen der FE-Analyse für jeden Punkt des Kreuzprobenmodells ermittelt. Der so folgende minimale Lebensdauerwert entspricht dann der vorhergesagten Anrisslebensdauer des jeweils analysierten Kreuzprobenversuchs.

Bei den *equi-biaxialen* Kreuzproben ergab sich der vorhergesagte Anrissort in der Mittelebene auf der Winkelhalbierenden zwischen den beiden Belastungsrichtungen (siehe Bild 9). Im Fall der *biaxialen* Kreuzproben mit Lastverhältnissen kleiner 1 lag der vorhergesagte Anrissort mehr im zentralen flachen Testgebiet nahe der jeweiligen Achse der maximalen Probenbelastung.

Rissfortschrittslebensdauervorhersage

Die Lebensdauer für den Bereich des stabilen zyklischen Rissfortschrittes wurde für die analysierten Kreuzproben jeweils an dem vorhergesagten Anrissort mit Hilfe der bekannten Paris-Gleichung [7]

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (4)$$

abgeschätzt. Hierbei steht die Rissfortschrittsrate da/dN mit der Schwingbreite ΔK der Spannungsintensität über die hier an Udimet720Li angepassten, temperaturabhängigen Werkstoffkonstanten C und m in Beziehung. Die für ΔK maßgebenden Hauptspannungswerte wurden dabei zu den Zeitpunkten der maximalen wie der minimalen lokalen Beanspruchung innerhalb des simulierten stabilisierten (hier sechsten) Belastungszyklus' ermittelt. Bild 9 zeigt am Beispiel des zuvor betrachteten *equi-biaxialen* Kreuzprobenversuches den in der Mittelebene vorhergesagten Anrissort und die für den Rissfortschritt maßgebende Ebene der größten Hauptnormalspannung. Aufgrund der Lage des Anrissortes wurde hier wie bei allen anderen *equi-biaxialen* Tests von einem innenliegenden Riss mit einer effektiven Anfangsrisslänge von 0.18mm ausgegangen, die ihrerseits aus bruchmechanischen Analysen einachsiger Standard-Rissproben von Udimet720Li resultierte. Die Berechnung des Spannungsintensitätsfaktors für den Innenriss erfolgte hierbei nach Newman & Raju [9]. Die bruchmechanische Analyse der *biaxialen* Tests erfolgte in analoger Weise ausgehend von dem jeweils vorhergesagten Anrissort, wobei die für den Rissfortschritt maßgebende Ebene im Allgemeinen normal zur Hauptbelastungsrichtung der Probe war. Bei Annahme eines Oberflächenrisses gleicher effektiver Anfangsrisslänge (0.18mm) unterschieden sich bei den Kreuzprobenanalysen die vorhergesagten Rissfortschrittslebensdauern von denjenigen unter Annahme des Innenrisses um weniger als 10%. Die vorhergesagte Gesamtlebensdauer einer Kreuzprobe ergibt sich dann aus der Summe der ermittelten Anrisslebensdauer nach Gleichung (3) und der Rissfortschrittslebensdauer nach Gleichung (4).

Ergebnisse der Lebensdauervorhersagen

Die zuvor beschriebene Vorgehensweise der Spannungsanalyse und Lebensdauervorhersage wurde bei der FE-Analyse der Kreuzproben angewandt. Für jeden analysierten Kreuzprobentest wurden die aus Anrisslebensdauer nach Gleichung (3) und aus Rissfortschrittslebensdauer nach Gleichung (4) ermittelte Gesamtlebensdauer mit der zugehörigen experimentell ermittelten Bruchlebensdauer verglichen.

Bild 10 zeigt den Vergleich zwischen vorhergesagten und experimentellen Lebensdauern für die 19 *equi-biaxialen* und die 17 *biaxialen* LCF-Versuche, welche die drei betrachteten Lastverhältnisse (0.25, 0.5, 0.75) für alle 3 Versuchstemperaturen abdecken. Die überwiegende Mehrzahl der Vorhersageergebnisse liegt dabei innerhalb des Streubandes vom Faktor 2. Für die Kreuzprobenversuche mit längerer Haltezeit (120s) konnte im Vergleich zu denjenigen mit kurzer Haltezeit (1s) eine insgesamt bessere Vorhersage erzielt werden. Während hier die meisten Vorhersagen innerhalb des inneren Streubandes (Faktor 2) liegen, verteilen sich die Vorhersagen für die Kreuzprobenversuche mit kurzer Haltezeit über den gesamten Streubandbereich mit Faktor 4. Zu erwähnen ist, dass die Wiederholung eines

biaxialen LCF-Tests zu einer zyklischen Bruchlebensdauer führte, die sich um einen Faktor 2 unterschied zu einem vergleichbaren Test mit identischen Versuchsbedingungen und gleicher Dicke (0.9mm) des zentralen Testgebietes (siehe Bild 10).

Der Vergleich der vorhergesagten und experimentellen Lebensdauern in Abhängigkeit der Lastverhältnisse der Kreuzproben ist in Bild 11 wiedergegeben. Hierbei zeigt sich, dass die durchschnittlichen Streuungen der Lebensdauervorhersagen für *equi-biaxiale* Kreuzprobenversuche (Lastverhältnis 1.0) insgesamt geringer ausfallen als für *biaxiale* Tests mit kleinen Lastverhältnissen von 0.25. Die vorhergesagte Anrisslebensdauer war bei allen analysierten *equi-biaxialen* LCF-Versuchen sowie bei den *biaxialen* LCF-Versuchen mit langer Haltezeit generell von der Kriechlebensdauer dominiert, die um ein bis zwei Größenordnungen kleiner ausfiel als die jeweils ermittelte zyklische Ermüdungslebensdauer. Bei den *biaxialen* Tests mit kurzer Haltezeit und zugleich kleineren Lastverhältnissen (0.25 und 0.5) wurde die vorhergesagte Anrisslebensdauer hingegen von dem Ermüdungsanteil bestimmt. Für Lastverhältnisse größer 0.5 bis hin zum *equi-biaxialen* Belastungsfall sowie mit steigenden Temperaturen ergaben die Anrisslebensdauervorhersagen zunehmend dominante Kriechlebensdaueranteile. Die Anteile der Rissfortschrittslebensdauer an der ermittelten Gesamtlebensdauer sind bei den Kreuzprobenversuchen mit kurzer Haltezeit generell deutlich niedriger (ca. 10%) als bei denjenigen mit langer Haltezeit, wo diese im Bereich von 20 bis 50% der jeweils vorhergesagten Gesamtlebensdauer liegen.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Lebensdauervorhersagen an *equi-biaxialen* und *biaxialen* LCF-Versuchen führten insgesamt zu zufriedenstellenden Resultaten, die verglichen mit den experimentellen Ergebnissen überwiegend im Streubandbereich von Faktor 2 lagen. Generell fiel dabei die Lebensdauervorhersage für die Kreuzprobenversuche mit langer Haltezeit besser aus als für diejenigen mit kurzer Haltezeit. Zukünftig ist geplant, die Vorhersage der Anrisslebensdauer im Bereich der zyklischen Ermüdungsvorhersage auf der Basis weiterer Kreuzprobenversuche zu verbessern, die bei niedrigeren, nicht kriechrelevanten Temperaturen unter rein ermüdungsspezifischen Bedingungen durchgeführt werden sollen. Im Bereich der Rissfortschrittslebensdauer sollen zukünftig insbesondere der Einfluss ausgeprägter inelastischer Dehnungsfelder auf das Rissfortschrittsverhalten näher untersucht und verbesserte Vorhersagemethoden abgeleitet werden.

Danksagung

Teile der im vorliegenden Beitrag vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des durch das Bundesministerium für Wirtschaft geförderten Luftfahrtforschungs- und Technologieprogramms unter der Projektnummer 20T9903 generiert.

Literatur

- [1] Rumi, M., Verformungsverhalten der Hochdruckturbinen-Scheibenlegierung Udimet720Li bei hohen Temperaturen, Dissertation, Berlin, Germany, März 2000.
- [2] König, G., Development of an Understanding of Material Properties under the Combined Influence of Creep, Fatigue and Oxidation, *Synthesis Report for BRITE-EuRAM project BE6021 (1993-1997)*, November 1997.

- [3] Mróz, Z., On the Description of Anisotropic Hardening, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 15, 1967, pp. 163-175.
- [4] Mróz, Z., An attempt to describe the behavior of metals under cyclic loads using a more general work hardening model, *Acta Mechanica*, Vol. 7, 1969, pp. 199-212.
- [5] Socie, D., Marquis, G., *Multiaxial Fatigue*, SAE, Society of Automotive Engineers, Inc., 2000.
- [6] Williams, S., The implementation of creep data in component FE analyses, *Proc. on the first international conference on component optimisation*, 29th March to 1st April 1999, Eds. W.J. Evans, R.W. Evans & M.R. Bache, pp. 139-146.
- [7] Radaj, D., *Ermüdungsfestigkeit*, Springer-Verlag, 1995.
- [8] Suresh, S., *Fatigue of Materials*, Second Edition, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1998.
- [9] Newman, J.C., Raju, I.S., Stress intensity factor equations for cracks in three-dimensional finite bodies, NASA technical memorandum 83200, 1981.

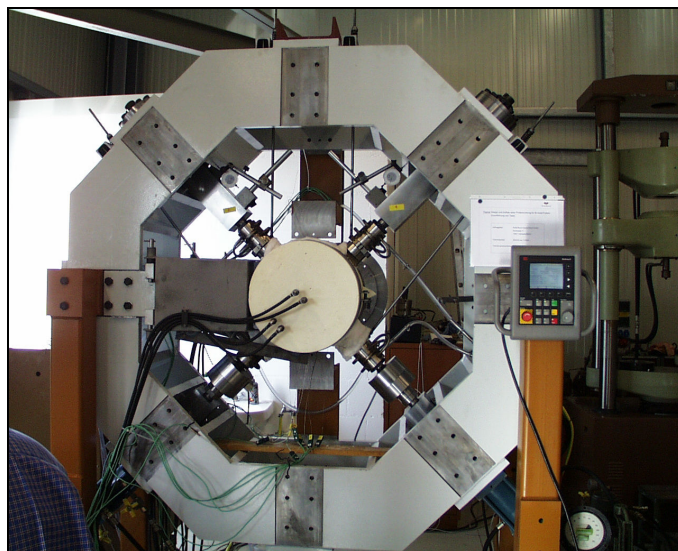


Bild 1: Prüfstand für Kreuzprobenversuche

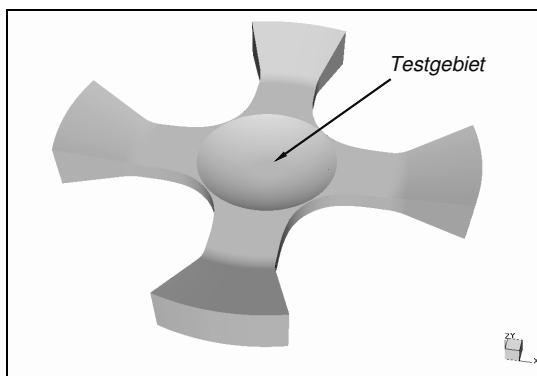


Bild 2: Kreuzprobe (schematisch)

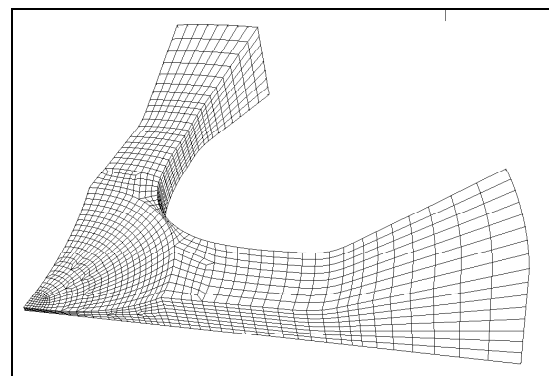


Bild 3: FE Modell der Kreuzprobe (Achtelmodell)

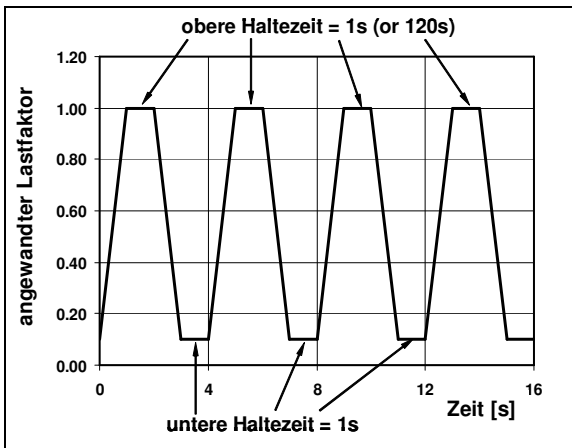


Bild 4: Testzyklus (schematisch)

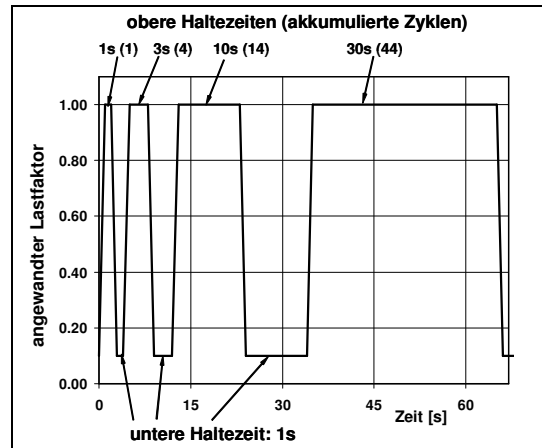


Bild 5: Veranschaulichung der äquivalenten Zyklen

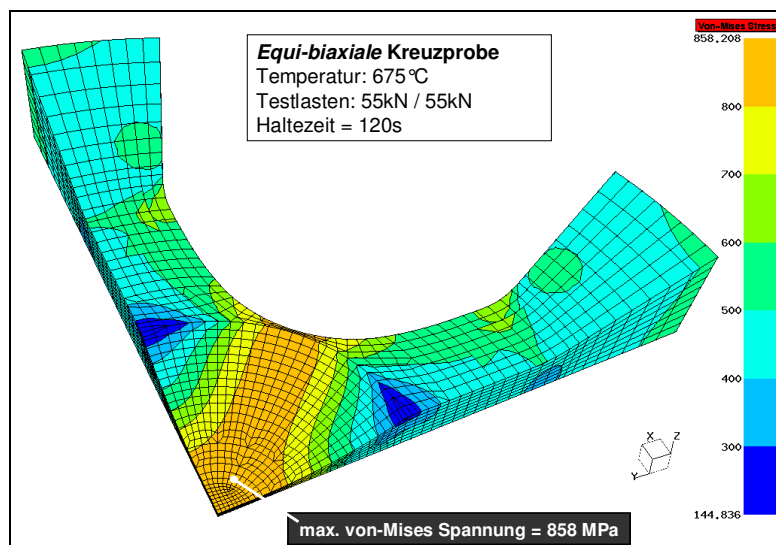


Bild 6: Verteilung der von-Mises Spannung für eine *equi-biaxiale* Kreuzprobe

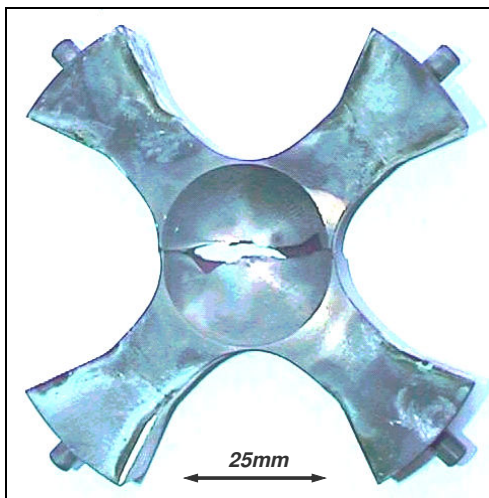


Bild 7: Gerissene *equi-biaxiale* Probe (675 °C, 55/55kN, Haltezeit=120s)

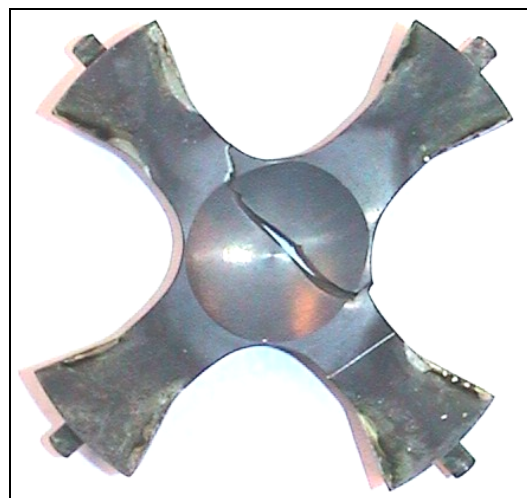


Bild 8: Gerissene *biaxiale* Probe (700 °C, 52/26kN, Haltezeit =120s)

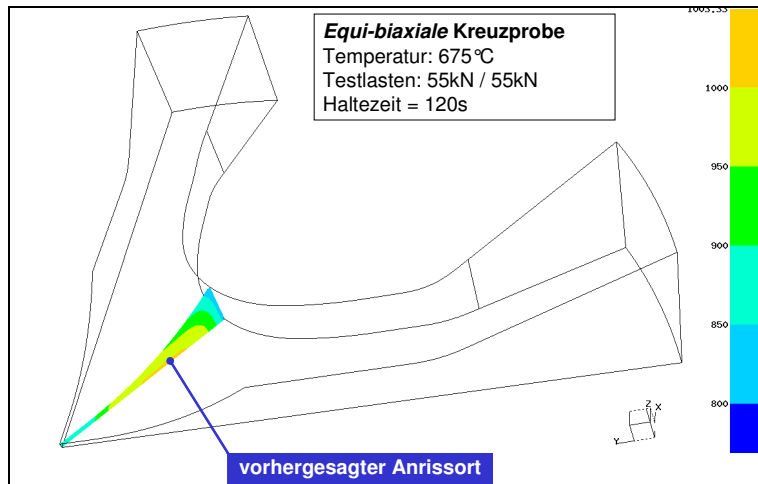


Bild 9: Rissfortschrittsebene mit Verteilung der Hauptnormalspannung

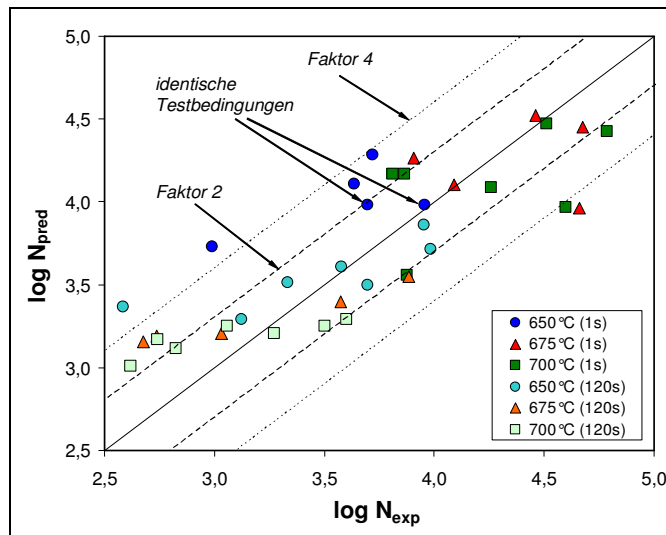


Bild 10: Lebensdauerkorrelationen für verschiedene Temperaturen

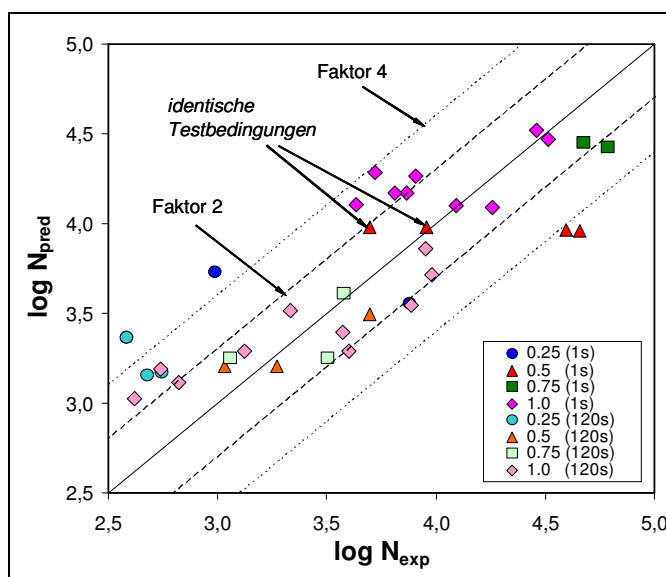


Bild 11: Lebensdauerkorrelationen für verschiedene Lastverhältnisse