

Dr.-Ing. Josef Ziebs
Dr.-Ing. Hellmuth Klingelhöffer
Dr.-Ing. Jürgen Meersmann
Dr.-Ing. Holger Frenz

**Gesetzmäßigkeiten für die
werkstoffmechanische Be-
schreibung der einkristallinen
Nickelbasislegierung SC 16
unter ein- und mehrachsiger
Beanspruchung**

222

Forschungsbericht



Die Aufgaben der BAM stehen unter der Leitlinie:

Sicherheit und Zuverlässigkeit in Chemie- und Materialtechnik

Die BAM hat gemäß ihrem Gründungserlaß die Zweckbestimmung, die Entwicklung der deutschen Wirtschaft zu fördern. Sie ist im Aufgabenverbund „Material – Chemie – Umwelt – Sicherheit“ zuständig für:

- Hoheitliche Funktionen zur öffentlichen technischen Sicherheit, insbesondere im Gefahrstoff- und Gefahrgutrechtsbereich;
- Mitarbeit bei der Entwicklung entsprechender gesetzlicher Regelungen, z. B. bei der Festlegung von Sicherheitsstandards und Grenzwerten;
- Beratung der Bundesregierung, der Wirtschaft sowie der nationalen und internationalen Organisationen im Bereich der Materialtechnik und Chemie;
- Entwicklung und Bereitstellung von Referenzmaterialien und -verfahren, insbesondere der analytischen Chemie und der Prüftechnik;
- Unterstützung der Normung und anderer technischer Regeln für die Beurteilung von Stoffen, Materialien, Konstruktionen und Verfahren im Hinblick auf die Schadensfrüherkennung bzw. -vermeidung, den Umweltschutz und den Erhalt volkswirtschaftlicher Werte.

Die Tätigkeitsbereiche

Das Tätigkeitsspektrum der BAM umfaßt die sich ergänzenden und aufeinander bezogenen Tätigkeiten:

- > Forschung und Entwicklung
- > Prüfung, Analyse und Zulassung
- > Beratung und Information.

Die nationale und internationale Zusammenarbeit

Die Aufgaben der BAM für Technik, Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft erfordern eine interdisziplinäre Zusammenarbeit. Insofern arbeitet die Bundesanstalt mit Technologieinstitutionen des In- und Auslandes, insbesondere den nationalen Schwesterinstituten, eng zusammen. Sie berät Bundesministerien, Wirtschaftsverbände, Industrieunternehmen sowie Verbraucherorganisationen und unterstützt mit Fachgutachten Verwaltungsbehörden sowie Gerichte. Daneben ist sie in die internationale technische Zusammenarbeit eingebunden und im Bereich „Meßwesen – Normung – Prüftechnik – Qualitätssicherung“ (MNPQ) als nationale Institution für die Prüftechnik zuständig. Die Mitarbeiter der Bundesanstalt wirken in zahlreichen Fachgremien, gesetzlichen Körperschaften und normensetzenden Institutionen an der Aufstellung von technischen Regeln und Sicherheitsbestimmungen mit und vertreten die Bundesrepublik in nationalen und supranationalen Einrichtungen.

Der Status

Die BAM ist als technisch-wissenschaftliche Bundesbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft Nachfolgeinstitution des 1870 gegründeten Staatlichen Materialprüfungsamtes sowie der 1920 gebildeten Chemisch-Technischen Reichsanstalt (CTR). Sie hat dementsprechend die Funktion einer materialtechnischen und chemisch-technischen Bundesanstalt. In ihr sind etwa 1700 Mitarbeiter, darunter mehr als 800 Wissenschaftler und Ingenieure, auf dem Stammgelände in Berlin-Lichterfelde sowie auf den Zweiggeländen in Berlin-Steglitz und Berlin-Adlershof tätig.

Dr.-Ing. Josef Ziebs
Dr.-Ing. Hellmuth Klingelhöffer
Dr.-Ing. Jürgen Meersmann
Dr.-Ing. Holger Frenz

**Gesetzmäßigkeiten für die
werkstoffmechanische Be-
schreibung der einkristallinen
Nickelbasislegierung SC 16
unter ein- und mehrachsiger
Beanspruchung**

Forschungsbericht 222

Berlin, 1998

Projektleiter:

Dr.-Ing. Josef Ziebs

Beteiligte Mitarbeiter:

Dr.-Ing. Hellmuth Klingelhöffer

Dr.-Ing. Jürgen Meersmann

Dipl.-Ing. Hans-Joachim Kühn

Dipl.-Ing. Wolfgang Wedell

Dipl.-Ing. Etienne Krämer

Dr.-Ing. Holger Frenz

Dipl.-Ing. Jürgen Olschewski

Impressum

Herausgegeben von
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin
Postanschrift: 12200 Berlin
Telefon (0 30) 81 04-0
Telefax (0 30) 8 11 20 29

Copyright © 1998 by Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven

Herstellung und Verlag:
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Bürgermeister-Smidt-Str. 74-76, 27568 Bremerhaven
Postfach 10 11 10, 27511 Bremerhaven
Telefon (04 71) 9 45 44-0
Telefax (04 71) 9 45 44 77/88

Umschlag: Lutz Mittenzwei
Layout: BAM, Referat G.3

ISSN 0938-5533
ISBN 3-89701-037-2

Kurzfassung

Zur vollen Ausschöpfung des Potentials ein- und polykristalliner Werkstoffe zum Einsatz in Gasturbinen sind noch erhebliche wissenschaftliche Forschungsanstrengungen notwendig. Die Zielrichtung höherer Energieeffizienz bei verringerter Umweltbelastung steht dabei im Vordergrund. Für umfassende anwendungsbezogene Lösungen kommt der Kenntnis der Zusammenhänge zwischen den werkstoffmechanischen Mikro- und Makroeigenschaften und der Werkstoffmodellierung entscheidende Bedeutung zu.

Dieser Forschungsbericht gibt einen umfassenden Überblick zum aktuellen Kenntnisstand von Nickelbasis-Legierungen am Beispiel von IN 738 LC und SC 16 unter ein- und mehrachsiger Hochtemperaturbeanspruchung.

Summary

Uni- und multiaxial high temperature behaviour of IN 738 LC and SC 16

The potential of poly- and single crystalline materials for use in gas turbines ist not yet exhausted and requires further substancial research.

The primary research objektive is higher energy effizienz and the reduction of environmental damage. A knowledge of the macro- and microscopial mechanical properties of high temperature materials in conjunction with the modelling of the material behaviour is eeminently important to practical solutions for ist applications.

This research report gives a comprehensive review of the current knowledge of the nickel base superalloys IN 738 LC and SC 16 under uni- and multiaxial high temperature loading conditions.

Inhalt

	Seite	
1	Einleitung	7
2	Motivation des Projekts	7
3	Entwicklung des Projekts	7
4	Versuchsbedingungen	8
4.1	Werkstoff	8
4.2	Wärmebehandlung	8
4.3	Versuchseinrichtungen	8
5	Zugversuche an SC 16 im Vergleich zum IN 738 LC	9
5.1	Experimente	9
5.2	Ergebnisse und Diskussion der Zugversuche an nahe [001]-orientierten Proben	
5.3	Zugversuche an nahe [011]- und [111]-orientierten Proben	10
6	LCF-Versuche und Diskussion für SC 16 [001] im Vergleich zum IN 738 LC	13
6.1	Experimente	13
6.2	Ergebnisse und Diskussion zum zyklischen Ver- und Entfestigungsverhalten und zur Lebensdauer	13
6.3	Allgemeines LCF-Verhalten	15
7	Kriechen unter konstanter Last	16
7.1	Experimente	16
7.2	Vergleich des Kriechverhaltens von IN 738 LC und SC 16 [001]	16
7.3	Abhängigkeit der Kriecheigenschaften von der Kristallorientierung des SC 16 bei 950 °C	17
8	Das thermo-mechanische Spannungs-Dehnungsverhalten von IN 738 LC	20
8.1	Experimente	20
8.2	Ergebnisse und Diskussion	20
9	Anisotropes und inhomogenes Verhalten von SC 16 bei unterschiedlichen Belastungspfaden	26
9.1	Einführung	26
9.2	Experimente	26
9.3	Ergebnisse und Diskussion	26
9.3.1	Zugversuche [001]	26
9.3.2	Torsionsversuche; Orientierung [001]; Orientierung nahe [011]; Orientierung in der Mitte des Standarddreieck [001]-[011]-[111]	27
9.3.3	Zug-Torsionsversuche, Orientierung [001]	30

10	Bewertung der Ergebnisse	31
10.1	Kinetische Beziehungen	31
10.2	Verfestigung, einachsig	31
10.3	Zyklische Verfestigung	31
10.4	TMF-Versuche	31
10.5	SC 16	31
11	Zusammenfassung und Ausblick	32
12	Literatur	33
13	Veröffentlichungen zum Projekt	35

1 Einleitung

Gasturbinenschaufeln sind infolge thermisch-mechanischer Wechselbelastung bei An- und Abfahrvorgängen in Verbindung mit der Schaufelgeometrie zyklischen mehrachsigen auch nichtproportional sich ändernden Spannungs-Verzerrungs-Zuständen unterworfen. Dabei verursachen Flieh-, Biege-, Torsions-, Gaskräfte und Temperaturgradienten inelastische Verformungen bei den innen- und außengekühlten Schaufeln, die als Ursache der Schädigung bzw. des Ausfalls der Schaufel betrachtet werden müssen. Erst die Kenntnis der Gesetzmäßigkeiten des Werkstoffverhaltens unter diesen komplexen Beanspruchungsbedingungen und das Verständnis der zugrundeliegenden werkstoffmechanischen Ent- und Verfestigungs- sowie der Schädigungsmechanismen machen eine effiziente Auslegung der Turbinenschaufeln möglich. Hauptziel der Arbeiten war daher die werkstoffmechanische Charakterisierung der poly- und der einkristallinen Nickelbasislegierung IN 738 LC und SC 16 unter proportionalen und nichtproportionalen mehrachsigen sowie thermisch-mechanischen Beanspruchungszuständen und bei komplexer Belastungsgeschichte. Dabei war ebenso zu klären, inwieweit beim IN 738 LC mittels der J_2 -Theorie das Spannungs-Verzerrungs-Verhalten mehrachsiger Beanspruchungen durch einachsige Beanspruchungen erfaßt werden kann. Bei der einkristallinen Superlegierung SC 16 sollten die wichtigsten Aspekte zum anisotropen-, temperatur-, geschwindigkeits- und geschichtsabhängigen Werkstoffverhalten unter ein- und mehrachsiger Beanspruchung aufgeklärt werden.

Der folgende Bericht beschränkt sich auf einige exemplarische Ergebnisse aus dem umrissenen Aufgabenfeld.

2 Motivation des Projektes

Wachsende Forderungen an Betriebssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit waren richtungweisende Gesichtspunkte bei der Aufnahme der Arbeiten. Für alle derzeit im Gasturbinenbau gebräuchlichen Nickelbasis-Legierungen einschließlich gerichtet erstarrter oder einkristalliner Werkstoffe existierte zwar bereits ein wertvoller Fundus an Forschungsergebnissen, aber für die volle Ausschöpfung des technisch-wissenschaftlichen Potentials dieser Werkstoffe waren und sind noch erhebliche Forschungsanstrengungen nötig. Für umfassende werkstofftechnische Lösungen kommt heute der Kenntnis der Zusammenhänge zwischen den werkstoffmechanischen Mikro- und Makro-

eigenschaften und einer Werkstoffmodellierung entscheidende Bedeutung zu.

Die Aufgabenstellung und die Zielsetzung dieses Projektes sind in den Sonderforschungsbereich 339 „Schaufeln und Scheiben in Gasturbinen – Werkstoff- und Bauteilverhalten“ eingebunden. Zur gezielten Steigerung der Hochtemperaturfestigkeit und Bauteilzuverlässigkeit war das temperatur-, geschwindigkeits- und geschichtsabhängige Verformungs- und Bruchverhalten der poly- und einkristallinen Nickelbasislegierungen IN 738 LC und SC 16 unter ein- und mehrachsiger und wechselnder thermischer Beanspruchung zu erfassen und zu bewerten. Weiterhin sollte ein Beitrag zum besseren metallphysikalischen Verständnis der im Material ablaufenden Ver- und Entfestigungsvorgänge sowie der Schädigungs- und Bruchmechanismen geliefert und damit die Analyse, Verifizierung und Weiterentwicklung der viskoplastischen Materialmodelle von Chaboche und Bodner-Partom vorangetrieben werden.

3 Entwicklung des Projektes

Im Forschungsbericht 1990–1992 war insbesondere über das Verhalten von mehrachsigen Zug-Torsions-Versuchen und über das Verhalten von Abfolgen von proportionaler und nicht proportionaler Beanspruchung an IN 738 LC berichtet worden. Ein deutlicher Geschichtseinfluß einer Vorverformung wurde bei der Abfolge vom kreisförmigen Dehnungspfad zum proportionalen Dehnungspfad bei 600 °C, der Vergleichsdehnungsgeschwindigkeit $\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ sowie $\dot{\epsilon} = 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ und 750 °C, $\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ beobachtet worden. Bedeutsam und stark ausgeprägt war ebenso die Spannungsrelaxation bzw. die progressive axiale Verformung (Ratchetting) bei zyklischer Torsion und konstanter axialer Vorverformung bzw. Vorspannung. Die Ergebnisse wurden inzwischen publiziert [1]. Für das zügige Verformungsverhalten von IN 738 LC konnten die Abhängigkeiten der Zugfestigkeit, der Dehngrenze und der Bruchdehnung von der Temperatur und Dehnungsgeschwindigkeit mit der sich entwickelnden Mikrostruktur erklärt werden [2]. Die bis 1993 durchgeführten TMF-Versuche gaben Hinweise, daß das nichtisotherme Verhalten der Aufheizphase aus dem isothermen Verhalten abgeleitet werden kann [3].

Als Aufgabe im Berichtszeitraum 1993–1996 waren folgende Probleme zu bearbeiten:

– Das ein- und mehrachsige thermomechanische Werkstoffverhalten von IN 738 LC war mit der Zielstellung zu untersuchen, dieses komplexe Werkstoffverhalten mit abgestufter Komplexität und aufgeglie-

dert nach geschwindigkeits-, temperatur- und geschichtsabhängigen Parametern bzw. Einflüssen zu beschreiben [4, 5].

– Das elastische und plastische anisotrope Verformungs- und Bruchverhalten von SC 16 war in Abhängigkeit der Probenorientierung, der Temperatur und der Dehnungsgeschwindigkeit in Zug-, Wechseldehn- und Kriechversuchen zu klären und im Hinblick auf die Gesetzmäßigkeiten zu bewerten [6].

– Zug-, Torsion- und Zug-Torsion-Beanspruchungen am SC 16 mit unterschiedlichen Orientierungen wurden hinsichtlich des Verformungsverhaltens, der Umfangskontur (nicht mehr kreisförmiger Probenquerschnitt) und der Ausbildung der Verteilung von inhomogenen Verformungen untersucht. Als Ergänzung wurde ein viskoplastisches Modell auf der Grundlage der Gleitsysteme in Kombination mit einem FE-Programm (ZeBuLoN) benutzt, um die im Experiment gefundene Verformungsverteilung zu beschreiben [7].

4 Versuchsbedingungen

4.1 Werkstoff

Die poly-(IN 738 LC) bzw. einkristallinen (SC 16) Proben wurden als konturnah gegossene Feingußrohlinge von der Firma Thyssen Guß AG, Bochum, hergestellt, wärmebehandelt, mit Hilfe des automatisierten Laue-Verfahrens dem Standard-Orientierungsdreieck [001]-[011]-[111] zugeordnet. Die Fertigbearbeitung der Proben erfolgte in der BAM durch Drehen und Schleifen. Die chemische Zusammensetzung der beiden Superlegierungen ist in der *Tabelle 1* zusammengefaßt.

4.2 Wärmebehandlung

Die IN 738 LC-Standardwärmebehandlung bestand aus einer Teillösungsglühung von zwei Stunden bei 1120 °C, einer Luftabkühlung und einem anschließenden 24 Stunden Auslagern bei 850 °C. Die Wärmebehandlungsbedingungen für SC 16 waren:

Lösungsglühung: 1260 °C/2 h/Vakuum

Hochtemperaturauslagerung: 1100 °C/4 h/Vakuum

Auslagerung: 850 °C/24 h/Luftabkühlung

Beide Legierungen besitzen eine bimodale γ' -Verteilung mit einem γ' -Volumenanteil von 40 Prozent. Ein wichtiger Unterschied der Gefüge betrifft das Fehlen von Karbiden und vom γ - γ' -Eutektikum beim SC 16.

4.3 Versuchseinrichtungen

Der bei den Zug-, Kriech-, Wechseldehn (LCF)- und mehrachsigen und thermomechanischen Versuchen verwendete Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung wurden ausführlich im Forschungsbericht 1988-1989 sowie in [1] und [3] beschrieben.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der Legierungen IN 738 LC und SC 16

	Al	C	Co	Cr	Mo	Ta	Ti	W	Mn	Nb	Ni
IN 738 LC	3,40	0,105	8,70	15,99	1,77	1,90	3,40	2,61	0,03	0,82	Rest
SC 16	3,45	< 0,005	0,17	15,40	2,80	3,50	3,48	–	< 0,003	< 0,003	Rest

5 Zugversuche an SC 16 im Vergleich zum IN 738 LC

5.1 Experimente

Die werkstoffmechanischen Untersuchungen an der einkristallinen Nickelbasislegierung SC 16 sind vorwiegend an Proben mit [001]-naher Orientierung durchgeführt worden. Die Abweichung von der Ideal-Orientierung betrug maximal rund 10°. Eine Abweichung in dieser Größenordnung wird in der Praxis bei Turbinenschaufeln ebenfalls zugelassen. Daneben sind auch Untersuchungen an Proben mit [011]- und [111]-naher Orientierung durchgeführt worden. Diese Experimente konnten erst später begonnen werden, da das Abgießen der Proben von Thyssen Guß AG, Bochum, mit starker Zeitverzögerung durchgeführt wurde.

Das folgende Versuchsparameterfeld wurde untersucht:

Werkstoff: SC 16 mit der Orientierung nahe [001], [011] und [111]

Temperaturen: 20 °C, 400 °C, 650 °C, 750 °C, 850 °C, 950 °C, 1050 °C

Dehngeschwindigkeiten: 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-6} s⁻¹

Umgebungsmedium: Luft

5.2 Ergebnisse und Diskussion der Zugversuche an nahe [001]-orientierten Proben

In den Zugversuchen wurden die Zugfestigkeit, die 0,2-Prozent-Dehngrenze und die Bruchdehnung bestimmt. Die Ergebnisse wurden mit denen des polykristallinen Werkstoffes IN 738 LC verglichen, um die unterschiedlichen Eigenschaften der Werkstoffe

zu charakterisieren. In *Abb. 5.1* ist exemplarisch die Zugfestigkeit, die 0,2-Prozent-Dehngrenze und die Bruchdehnung in Abhängigkeit von der Temperatur bei der Dehngeschwindigkeit von 10^{-3} s⁻¹ dargestellt. Die Ergebnisse sind im Vergleich zum Werkstoff IN 738 LC aufgetragen. Die Zugfestigkeit steigt von Raumtemperatur bis ca. 750 °C für beide Werkstoffe leicht an, um dann bei weiter steigender Temperatur stark abzufallen. Sie unterscheidet sich bei beiden Werkstoffen nur wenig. Oberhalb von 750 °C wird eine geringfügig höhere Zugfestigkeit am SC 16 beobachtet. Die 0,2-Prozent-Dehngrenze ist bei beiden Werkstoffen ebenfalls ähnlich. Sie bleibt von Raumtemperatur bis ca. 750 °C auf einem nahezu konstanten Niveau und fällt mit weiter steigender Temperatur stark ab. Am meisten unterscheidet sich die Bruchdehnung, die beim einkristallinen Werkstoff viel höhere Werte annimmt als bei der polykristallinen Legierung. Die meisten Zugversuche an SC 16 wurden bis 20 Prozent Dehnung belastet. Danach wurde der Versuch abgebrochen, um Nachuntersuchungen durchführen zu können. Der Werkstoff IN 738 LC erreichte dagegen maximal etwa zehn Prozent Bruchdehnung, die überwiegend erst bei höherer Temperatur erreicht wurde.

Betrachtet man den Spannungs-Dehnungs-Verlauf von den Zugversuchen, *Abb. 5.2*, wird das unterschiedliche Verformungsverhalten beider Werkstoffe sichtbar. Der Werkstoff SC 16 zeigt bei Raumtemperatur ein nahezu elastisch-ideal plastisches Verhalten. Nach Erreichen der Fließgrenze erfolgt eine geringfügige Entfestigung. Nach Überschreiten von etwa drei Prozent Dehnung verfestigt der Werkstoff jedoch leicht. Makroskopisch werden die Proben elliptisch. Auf der Probenoberfläche sind Gleitlinien sichtbar, die auf

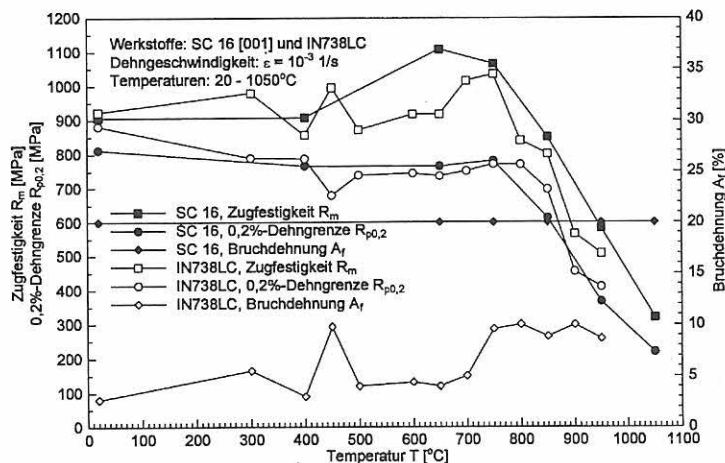


Abb. 5.1: Zugfestigkeit, 0,2-Prozent-Dehngrenze und Bruchdehnung im Zugversuch von SC 16 mit [001]-naher Orientierung und IN 738 LC in Abhängigkeit von der Temperatur bei der Dehngeschwindigkeit 10^{-3} 1/s

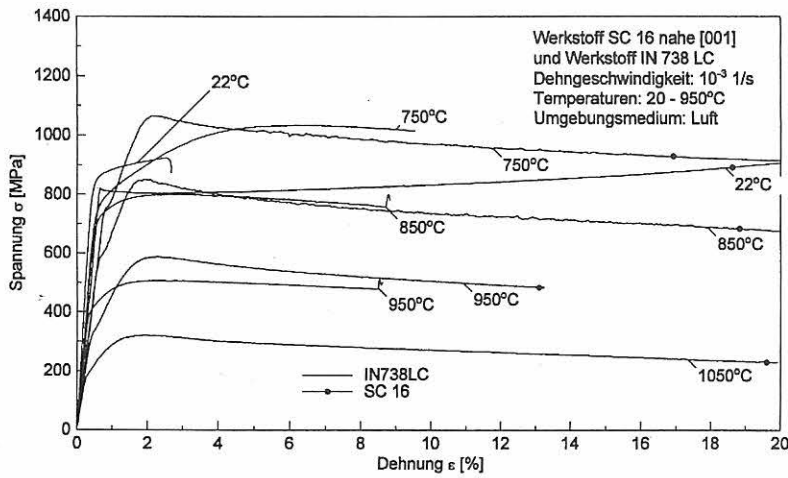


Abb. 5.2:
Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten im Zugversuch von SC 16 mit [001]-naher Orientierung und IN 738 LC in Abhängigkeit von der Temperatur bei der Dehngeschwindigkeit von 10^{-3} 1/s

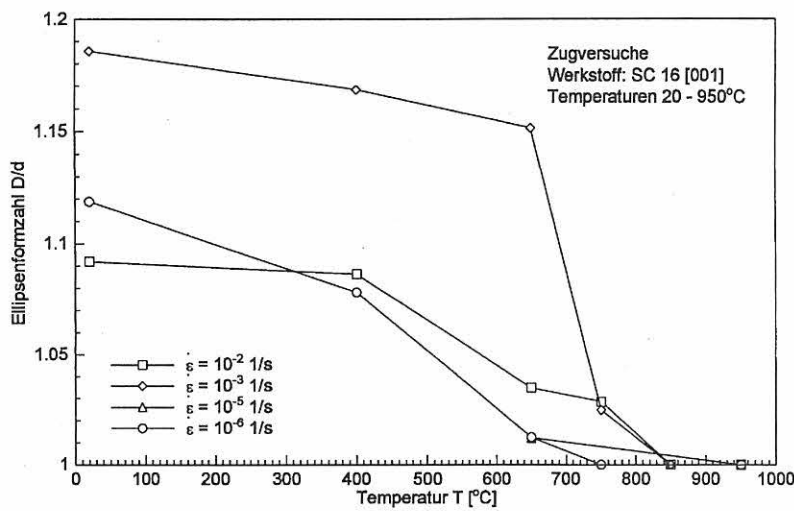


Abb. 5.3:
Die Ausbildung eines elliptischen Probenquerschnitts im Zugversuch von SC 16 mit [001]-naher Orientierung in Abhängigkeit von der Temperatur bei Dehngeschwindigkeiten von 10^{-2} - 10^{-6} 1/s.

beiden Seiten der Probe einen parabolischen Verlauf aufweisen. Die Verformung innerhalb der Meßstrecke der Proben war bei Raumtemperatur gleichmäßig, was auf Einfachgleitung hindeutet. Bei höherer Temperatur tritt nach Durchlaufen des elastischen Bereiches der Probe eine mehr oder weniger starke Verfestigung der Probe auf, die bei 750 °C am meisten ausgeprägt ist. Nach Überschreiten des Spannungsmaximums entfestigte der Werkstoff bis zum Bruch.

Das Verformungsverhalten [001]-orientierter Proben, SC 16, kann in drei Temperaturbereiche eingeteilt werden. Bei Temperaturen < 760 °C sind die Festigkeitseigenschaften (Dehngrenze, Zugfestigkeit) unabhängig von der Dehngeschwindigkeit. Die plastische Verformung erfolgt durch Oktaedergleitung und Schneiden der γ' -Teilchen. Bei Temperaturen > 800 °C sind die Festigkeitseigenschaften von der Dehngeschwindigkeit abhängig, die plastische Verformung beruht auf Oktaeder-

gleitung und Umgehen der γ' -Teilchen. Ein Übergangsbereich zwischen den o. a. Temperaturen kann deutlich definiert werden.

Die Neigung des Werkstoffes zur Bildung eines elliptischen Querschnitts der Probe im Bereich der Meßstrecke wurde häufig beobachtet. Diese geometrische Formänderung war bei höherer Temperatur weniger ausgeprägt oder trat gar nicht mehr auf, was in Abb. 5.3 dargestellt ist. Danach nimmt die Ellipsenbildung kontinuierlich mit zunehmender Temperatur ab. Oberhalb von 750 °C wurde sie gar nicht mehr beobachtet. Da die Untersuchung des Probenquerschnittes bei unterschiedlich stark verformten Proben durchgeführt wurde, wurde eine Normierung der Ellipsendurchmesser vorgenommen. Eine axial symmetrische (kreisförmige) Verformung kann nur bei mindestens fünf unabhängigen Gleitsystemen auftreten. Bei hohen Temperaturen verformen sich die Proben nahezu „isotrop“.

5.3 Zugversuche an nahe [011]- und [111]-orientierten Proben

Neben den Versuchen mit [001]-naher Orientierung wurde mit Untersuchungen in [011]- und [111]-naher Orientierung begonnen. Hierzu wurden Zugversuche bei Raumtemperatur und bei 950 °C durchgeführt. Sie wurden mit den Experimenten in [001]-Richtung verglichen. Der Spannungs-Dehnungs-Verlauf ist in *Abb. 5.4* dargestellt und die verformten Zugproben sind in *Abb. 5.5* wiedergegeben. Deutlich sichtbar ist bei den Raumtem-

peraturversuchen die je nach Orientierung unterschiedliche Steigung der elastischen Geraden. Dieses ist auf den orientierungsabhängigen E-Modul zurückzuführen. Theoretische Abschätzungen zeigten folgende Größenordnung für den orientierungsabhängigen E-Modul: $E_{[001]} < E_{[011]} < E_{[111]}$.

Dieses stimmt auch mit den experimentellen Ergebnissen bei RT und 950 °C überein. Sehr deutlich ist jedoch dem Diagramm (*unten*) das unterschiedliche Spannungs-Dehnungs-Verhalten zu entnehmen. Zusammenfassend kann folgendes Verformungsverhalten festgestellt werden:

Ergebnisse von [001]nahen und [011]nahen SC 16 Proben bei 950 °C.

< 760 °C	> 800 °C
[001]–Proben	
<ul style="list-style-type: none"> – Dehngeschwindigkeitsunabhängigkeit der Dehngrenze – wahrnehmbare Verfestigung – inhomogene Verformung Oktaedergleitung, Schneiden der γ'-Teilchen 	<ul style="list-style-type: none"> – Dehngeschwindigkeitsabhängigkeit der Dehngrenze – wahrnehmbare Verfestigung bis ~ 2 %, dann Entfestigung – homogene Verformung, Mehrfachgleiten auf Oktaedergleitsystemen, Umgeben der γ'-Teilchen
[011]–Proben	
<ul style="list-style-type: none"> – Dehngeschwindigkeitsunabhängigkeit der Dehngrenze – keine Verfestigung – inhomogene Verformung, Bildung von Knickbändern, Oktaedergleitung (<i>Bild 5.5</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> – Dehngeschwindigkeitsabhängigkeit der Dehngrenze – wahrnehmbare Verfestigung bis ~ 2 %, dann Sättigung – homogene Verformung, Mehrfachoktaedergleitung
[111] Proben	
<ul style="list-style-type: none"> – Dehngeschwindigkeitsunabhängigkeit der Dehngrenze – starke Verfestigung 	<ul style="list-style-type: none"> – Dehngeschwindigkeitsabhängigkeit der Dehngrenze – Verfestigung bis ~ 2 %

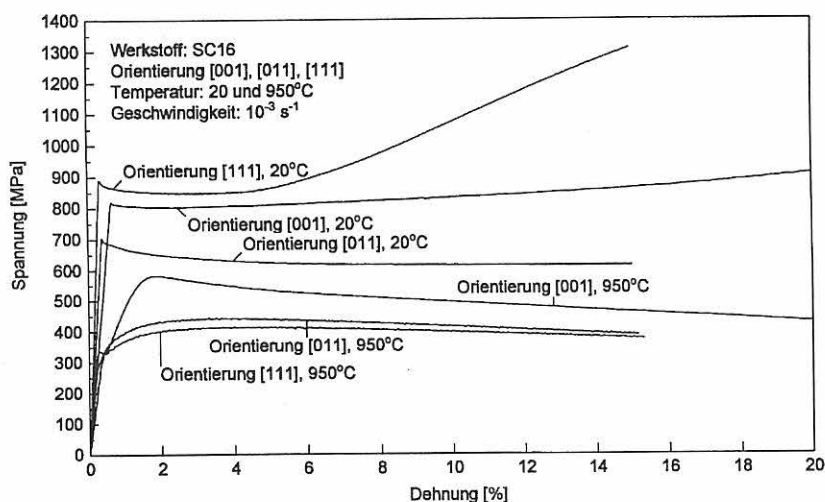


Abb. 5.4: Einfluß der Probenorientierung auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten im Zugversuch von SC 16 bei Raumtemperatur und bei 950 °C und der Dehngeschwindigkeit von 10^{-3} 1/s

In der Literatur sind mehrere Erklärungen für die Temperaturabhängigkeit der Dehngrenze in Nickelbasislegierungen vorgestellt worden. Hängt die Dehngrenze nicht von der Dehngeschwindigkeit ab, weist dies darauf hin, daß die Verformungsmechanismen nicht diffusionsabhängig sind [8]. Bei Abhängigkeit der Fließgrenze von der Dehngeschwindigkeit muß mit sehr starken Änderungen im aktivierten Gleitverhalten und/oder Veränderungen von Ordnungsparametern gerechnet werden [9]. γ/γ' -Verfestigungs- und Vergrößerungsmechanismen sind in erster Linie verantwortlich für den Anstieg der Fließgrenze von 600 °C bis 750 °C und für den Abfall der Dehngrenze im Temperaturbereich 750 °C bis 850 °C [10]. Das TAKEUCHI-KURAMOTO (T-K)-Modell [11] erklärt die Temperaturabhängigkeit der Fließgrenze aufgrund eines thermisch aktivierten Übergangs von Schraubenversetzungen aus einer Lage mit hoher Energie zu einer feststehenden Lage mit niedrigerer Energie.

LAL-CHIN-POPE (L-C-P-Modell) [12] zeigten, daß die Dehngrenze in Abhängigkeit der Temperatur mit dem thermisch aktivierten Quergleiten von Partialversetzungen von $\{111\}$ nach $\{100\}$ in Verbindung gebracht werden kann. Das Quergleiten wird dabei unterstützt von der entsprechenden Schubspannung auf den $\{100\}$ Ebenen und von der die SHOCKLEY-Partialversetzungen einengenden Spannung. PAIDAR-POPE-VITEK (P-P-V-Modell) [13] machen die Kernbreite der Partialversetzungen vor und nach dem Quergleiten im besonderen für das anormale Dehngrenzenverhalten verantwortlich. Im SUN-HAZZLEDINE-Modell [14] wird der Anstieg der Dehngrenze mit der Temperatur von der Häufigkeit des Zurück-Quergleitens auf die Oktaedergleitebene erklärt. Die Partialversetzungen, die auf die Oktaedergleitebene durch Rück-Quergleiten geschoben worden sind, sind sesshafte Versetzungen und dienen daher als Festpunkte.

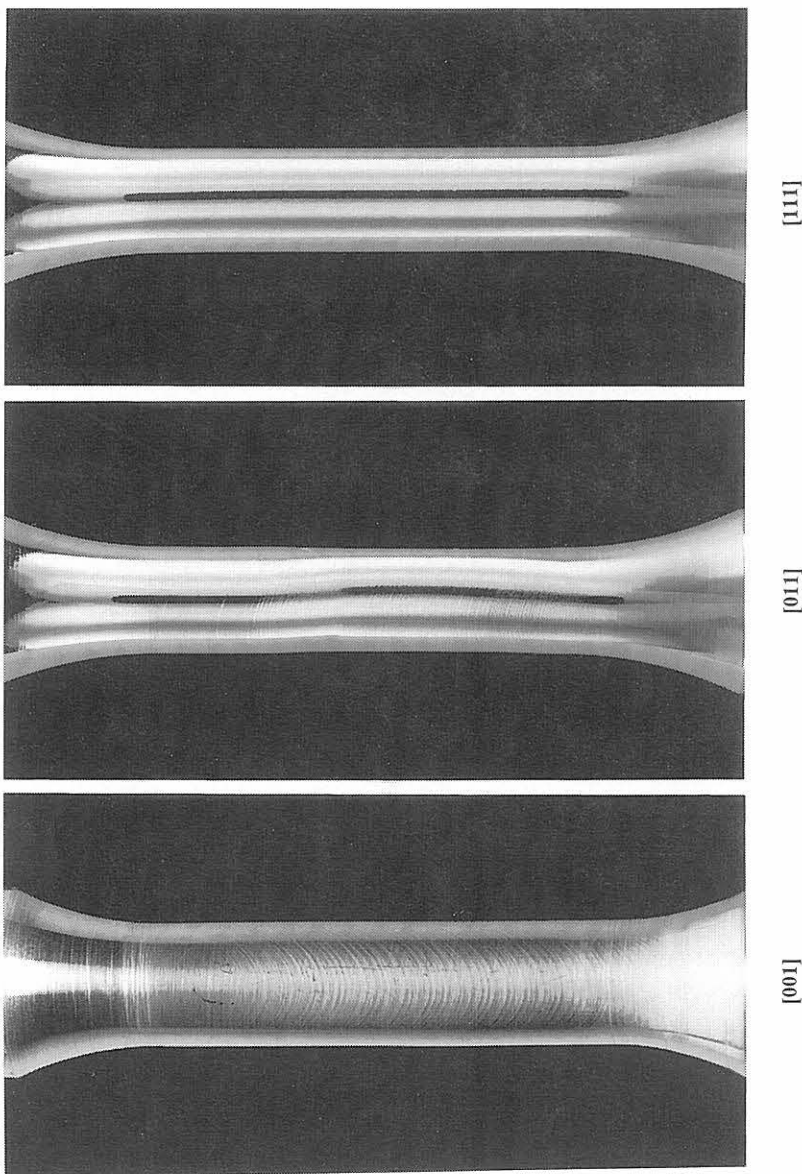


Abb. 5.5:
Gleitlinien auf Zugproben mit $[001]$ -, $[011]$ - und $[111]$ -Orientierung

6 LCF-Versuche und Diskussion für SC 16 [001] im Vergleich zum IN 738 LC

6.1 Experimente

Es wurden Zug-Druck-LCF-Versuche an SC 16 mit der Orientierung nahe [001] durchgeführt. Versuche mit anderen Orientierungen sind begonnen worden und werden in diesem Bericht nicht berücksichtigt. Folgende Versuchsparameter wurden variiert:

- Werkstoff:** SC6 nahe [001]
- Dehnungsschwingbreite:** 0,7 - 0,8 - 1,0 - 1,2 - 1,6 - 2,0 - 2,4 Prozent
- Dehngeschwindigkeit:** 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} s⁻¹
- Haltezeit:** ohne
- Temperatur:** 650 °C, 750 °C, 850 °C, 950 °C
- Umgebungsmedium:** Luft

6.2 Ergebnisse und Diskussion zum zyklischen Ver- und Entfestigungsverhalten und zur Lebensdauer

Die zyklische Spannung steigt mit zunehmender Dehnungsschwingbreite und mit abnehmender Temperatur bei beiden Werkstoffen. Dieses entspricht dem erwarteten Werkstoffverhalten. Zu Versuchsbeginn ist bei niedriger Dehnungsschwingbreite eine geringe Entfestigung und bei hoher Dehnungsschwingbreite eine geringe Verfestigung zu beobachten. Dieses deutet möglicherweise auf veränderte Verformungsmechanismen hin. Das zyklische Ver- und Entfestigungsverhalten von SC 16 und IN 738 LC ist in *Abb. 6.1* für unterschiedliche Dehngeschwindigkeiten bei 950 °C dargestellt. Bei abnehmender Dehngeschwindigkeit wird eine kleinere zy-

klische Spannung beobachtet, die auf Spannungsrelaxation zurückzuführen ist. Die plastische Dehnung steigt bei gleichbleibender Gesamtdehnung auf Kosten der elastischen Dehnung stark an. Die zyklischen Spannungen unterscheiden sich bei beiden Werkstoffen nur wenig.

Das zyklische Spannungs-Dehnungs-Verhalten von SC 16 ist in *Abb. 6.2* im Vergleich zum monotonen Spannungs-Dehnungs-Verhalten dargestellt. Bei 750 °C tritt eine Zug-Druck-Asymmetrie auf, wobei bei niedriger Dehnungsamplitude die Zugspannung größer ist als die Druckspannung. Bei Dehnungsamplituden oberhalb von ein Prozent kehrt sich dieser Effekt um und die Druckspannung ist größer als die Zugspannung. Dieses ist mit einer Verschiebung des Zugspannungsverlaufes zu niedrigeren Spannungen verbunden. Auffällig ist, daß die monotone Spannung ebenfalls in diesem Dehnungsbereich eine Veränderung des bisher geradlinigen Spannungsverlaufes (bei doppelt logarithmischer Darstellung) aufweist. Die besondere Form des Spannungsverlaufes wurde durch mehrere Versuche belegt und deutet auf eine Änderung des Verformungsmechanismus hin. Die Zug-Druck-Asymmetrie bei zyklischer Beanspruchung wurde in [15] näher erläutert. Sie ist sehr stark von der Temperatur und Dehngeschwindigkeit abhängig.

Bei hoher Dehngeschwindigkeit von 10^{-2} s⁻¹ liegt bei Dehnungsamplituden von 0,8 bis 1,2 Prozent die Zugspannung höher als die Druckspannung. Bei der Geschwindigkeit von 10^{-3} s⁻¹ ist die Zugspannung nur unterhalb von ein Prozent Dehnung größer als die Druckspannung, bei der Geschwindigkeit 10^{-4} s⁻¹ wurden

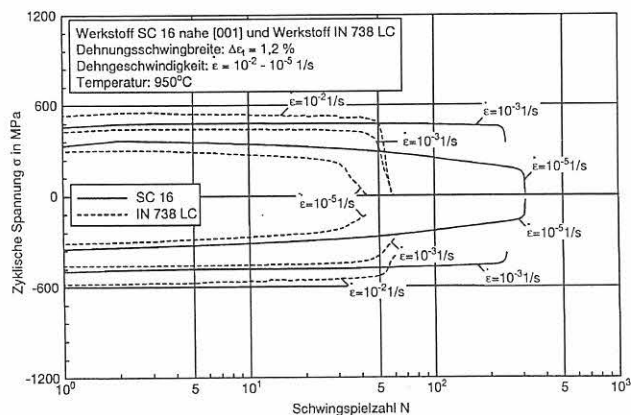


Abb. 6.1: Zyklische Ver- und Entfestigungskurven bei unterschiedlicher Dehngeschwindigkeit

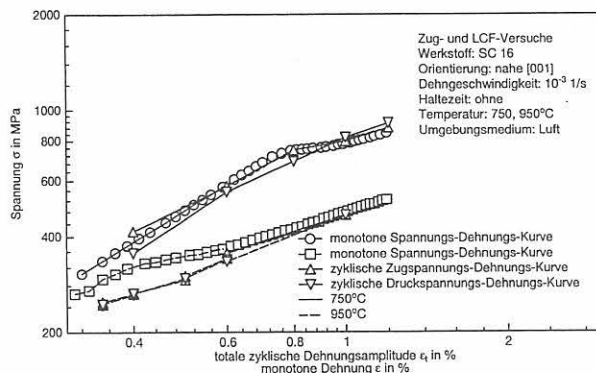


Abb. 6.2: Vergleich zwischen monotonem und zyklischen Spannungs-Dehnungs-Verhalten von SC 16 bei 750 und 950 °C

lediglich Experimente bei der Dehnungsamplitude von 0,6 und 0,8 Prozent durchgeführt. Hier lag die Zugspannung unterhalb der Druckspannung. Das gleiche Verhalten trat für den Versuch bei der Geschwindigkeit 10^{-5}s^{-1} und der Dehnungsamplitude von einem Prozent auf. Die Zug-Druck-Asymmetrie tritt nur bei mittleren Temperaturen um 750 °C auf und wird bei 950 °C nicht mehr beobachtet, *Abb. 6.2*.

Das zyklische Spannungs-Dehnungs-Verhalten wurde auch anhand von Spannungs-Dehnungs-Hysteresen untersucht. In den *Abb. 6.3 und 6.4* sind beispielhaft zwei Spannungs-Dehnungs-Hysteresen-Verläufe der ersten zehn Schwingspiele dargestellt. Es wird deutlich, daß sich das zyklische Spannungs-Dehnungs-Verhalten im ersten Zyklus von den darauffolgenden Schwingspielen unterscheidet. Dieses Verhalten tritt vorwiegend bei 750 °C auf.

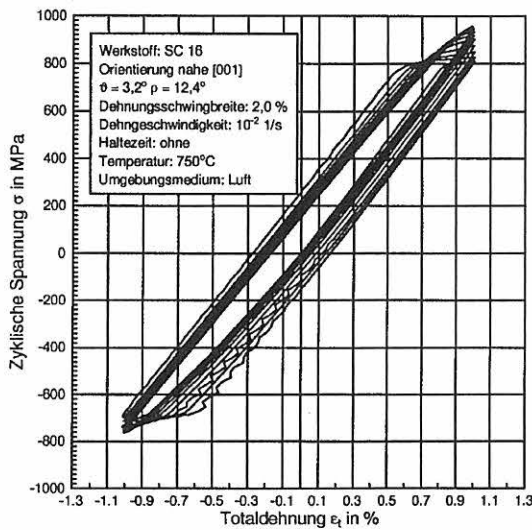


Abb. 6.3: Spannungs-Dehnungs-Hysteresis mit Verfestigung im Zug- und Druckbereich in den ersten zehn Schwingspielen

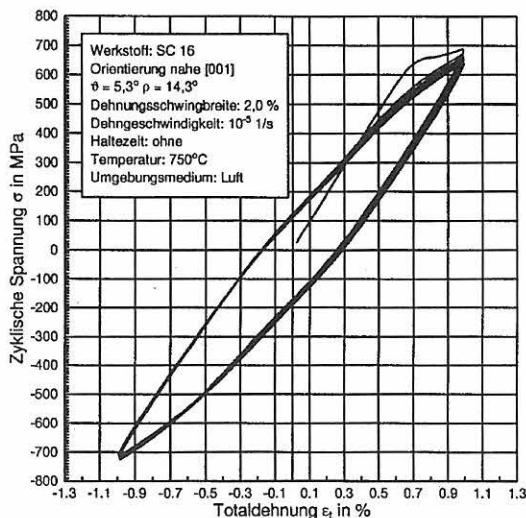


Abb. 6.4: Spannungs-Dehnungs-Hysteresis mit Entfestigung, besonders im Zugbereich in den ersten zehn Schwingspielen

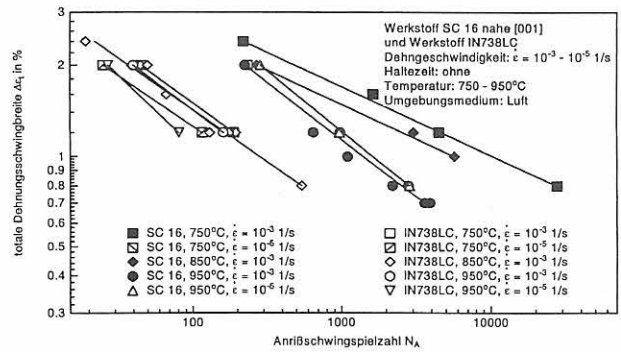
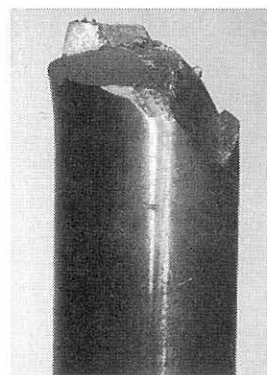


Abb. 6.5: Lebensdauer von SC 16 und IN 738 LC bei 750 bis 950 °C

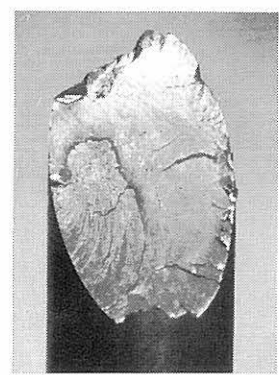
Während bei hoher Dehngeschwindigkeit (10^{-2}s^{-1}) eine starke Verfestigung im Zugbereich auftritt, verfestigt der Werkstoff im Druckbereich deutlich weniger (*Abb. 6.3*). Bei niedriger Dehngeschwindigkeit von 10^{-5}s^{-1} hat der erste 1/4-Zyklus im Zugbereich einen vollkommen anderen Verlauf als in den nachfolgenden Schwingspielen (*Abb. 6.4*). Hier liegt in einem größeren Bereich die Spannungs-Dehnungs-Kurve außerhalb der Hystereseschleifen von den darauffolgenden Zyklen. Dieses läßt eine Änderung des Verformungsmechanismus schon nach der ersten bzw. zweiten Lastumkehr vermuten.

Neben den umfangreichen Untersuchungen zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten des SC 16 sind zahlreiche Experimente zur Feststellung der Lebensdauer durchgeführt worden. Die Ergebnisse der Lebensdaueruntersuchungen sind in *Abb. 6.5* im Vergleich zum IN 738 LC zusammengestellt. Der Werkstoff SC 16 zeigt eine deutliche Abhängigkeit der Lebensdauer von der Temperatur zwischen 750 und 950 °C. Das ist der Bereich der thermisch bedingten Abnahme der Festigkeit des Werkstoffes mit zunehmender Temperatur. Bei der Legierung IN 738 LC liegen die erreichten Lebensdauern für alle Temperaturen in einem Streuband. Eine ausge-

SC 16, LCF, 750 °C



$\Delta \epsilon = 1,2 \%$, $\epsilon = 10^{-3} 1/s$,
 $N_B = 4939$, $t_{fracture} = 32,9 \text{ h}$



$\Delta \epsilon = 2,0 \%$, $\epsilon = 10^{-3} 1/s$,
 $N_B = 703$, $t_{fracture} = 7,8 \text{ h}$

Abb. 6.6: Bruchfläche von LCF-Versuch $\Delta \epsilon = 1,2 \%$; $\epsilon = 10^{-3} 1/s$, 750 °C

Abb. 6.7: Bruchfläche von LCF-Versuch, $\Delta \epsilon = 2,0 \%$, $\epsilon = 10^{-3} 1/s$, 750 °C

prägte Temperaturabhängigkeit der Lebensdauer wurde nicht beobachtet. Der Einfluß der Dehngeschwindigkeit ist für beide Werkstoffe ebenfalls in *Abb. 6.5* dargestellt. Die meisten Experimente wurden bei der Dehngeschwindigkeit 10^{-3}s^{-1} durchgeführt. Bei $750\text{ }^\circ\text{C}$ und $950\text{ }^\circ\text{C}$ wurden ergänzend einige Versuche bei der Dehnrates 10^{-5}s^{-1} unternommen. Bei der Legierung IN 738 LC sinkt die Lebensdauer bei niedrigerer Dehngeschwindigkeit geringfügig, während beim SC 16 die Anrißschwingspielzahlen leicht ansteigen. Ein ausgeprägter Einfluß ist auch hier bei beiden Werkstoffen nicht festzustellen. Das bedeutet, daß der Einfluß der Oxidation auf die Lebensdauer bei beiden Werkstoffen auch bei hohen Temperaturen keine dominante Rolle spielt.

Die LCF-Proben wurden bis zum Bruch belastet. An ausgewählten Proben wurden die Bruchflächen nachuntersucht. *Abb. 6.6* zeigt die Bruchfläche einer Probe, die bei 1,2 Prozent Dehnungsschwingbreite belastet wurde. Die Bruchfläche enthält einen Anteil, der senkrecht zur Beanspruchungsrichtung verläuft. Dieser Teil ist während der Ermüdungsbeanspruchung entstanden. In diesem Falle erfolgte die Rißausbreitung normalspannungskontrolliert. Der schräg zur Probenachse verlaufende Teil der Bruchfläche entspricht der Restbruchfläche, der durch einen Gewaltbruch entstanden ist. Hier verläuft der Bruch entlang von kristallographischen Gleitebenen. Anders verhält es sich bei der höheren Dehnungsschwingbreite von 2,0 Prozent, *Abb. 6.7*. Hier ist der Anteil der Ermüdungsbruchfläche sehr klein und makroskopisch nicht mehr eindeutig bestimmbar. Das Material zeigt ein verformungsarmes Verhalten. Hat sich ein kleiner Anriß gebildet, wächst der Riß nicht mehr normalspannungskontrolliert, sondern es kommt zu einem plötzlichen Scherbruch auf einer Gleitebene. Dieses Verhalten wurde bei $750\text{ }^\circ\text{C}$ beobachtet.

Daneben wurden Untersuchungen zum Einfluß der Haltezeit bei $950\text{ }^\circ\text{C}$ durchgeführt. Hierzu wurden Haltezeiten im Zug- oder Druckdehnungsmaximum von jeweils fünf

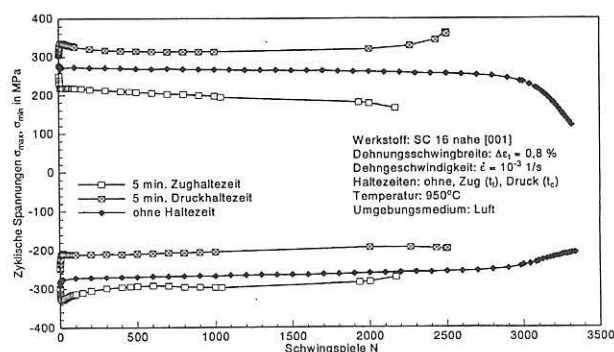


Abb. 6.8: Verlauf der zyklischen Zug- und Druckspannung bei der Einführung von Haltezeiten im Zug- und im Druckbereich gegenüber Versuchen ohne Haltezeit bei SC 16 nahe [001] bei $950\text{ }^\circ\text{C}$

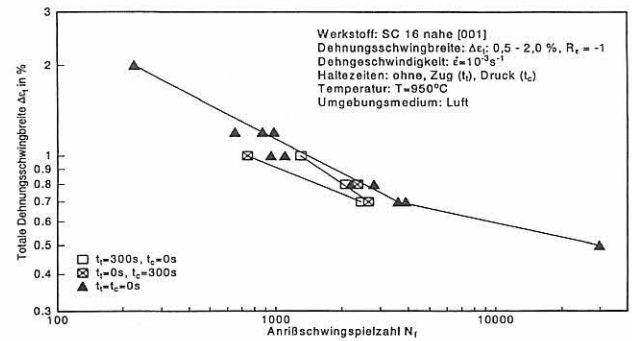


Abb. 6.9: Lebensdauer in Abhängigkeit von der Dehnungsschwingbreite bei Versuchen mit und ohne Haltezeit im Zug- und Druckbereich für SC 16 nahe [001] bei $950\text{ }^\circ\text{C}$

Minuten Dauer eingeführt. Betrachtet man das zyklische Ver- und Entfestigungsverhalten, erkennt man eine Verschiebung der Spannungsniveaus der maximalen Zug- und Druckspannungen (*Abb. 6.8*). Während sich bei Versuchen ohne Haltezeit eine nahezu symmetrische Spannungsverteilung mit betragsmäßig gleichen Zug- und Druckspannungen ergibt, werden bei Versuchen mit Zughaltezeit die Zugspannungen kleiner und die Druckspannungen größer. Bei Versuchen mit Druckhaltezeit verhält es sich genau umgekehrt. Die Spannungsdifferenz zwischen maximaler Zug- und Druckspannung bleibt dabei in allen Fällen nahezu konstant.

Da für einen Rißfortschritt in erster Linie Zugspannungen verantwortlich gemacht werden, ist zu erwarten, daß das unterschiedliche Zugspannungsniveau auch einen Einfluß auf das Rißfortschrittsverhalten und damit auch auf die Lebensdauer der Experimente hat. Das Rißfortschrittsverhalten ist explizit nicht untersucht worden. Die Lebensdauer der Versuche mit und ohne Haltezeiten ist in *Abb. 6.9* dargestellt. Die Versuche ohne Haltezeit erreichten überwiegend die längste Lebensdauer. Bei Versuchen mit Haltezeit zeigt sich die Tendenz, daß bei Haltezeiten im Druckbereich niedrigere Lebensdauern erreicht wurden als bei Versuchen mit Zughaltezeit. Jedoch war der Einfluß nicht sehr deutlich ausgeprägt, da die Haltezeiten mit fünf Minuten Länge relativ kurz gewählt waren.

6.3 Allgemeines LCF-Verhalten

Das Hochtemperaturverhalten von SC 16, [001], im LCF-Versuch wird gekennzeichnet durch niedrige Festigkeit, zyklische Spannungsstabilität oder leichte Entfestigung, nahezu isotropes Verhalten und eine relativ hohe Dehngeschwindigkeitsempfindlichkeit. Bei niedriger Temperatur ist das Verhalten durch hohe Festigkeit, zyklische Verfestigung, Orientierungsabhängigkeit, Zug-Druck-Asymmetrie und Dehngeschwindigkeitsunempfindlichkeit charakterisiert.

7 Kriechen unter konstanter Last

7.1 Experimente

Im Vordergrund stand der Vergleich des Kriechverhaltens zwischen IN 738 LC und SC 16 der Kristallorientierung [001]. Bei 850 °C und 950 °C wurden Anfangsspannungen zwischen 120 MPa und 446 MPa gewählt. Weiter sollte anhand von unterbrochenen Versuchen an SC 16 mit den Parametern 950 °C, 135 MPa, die Entwicklung der Mikrostrukturen bei steigender Dehnung ermittelt werden. Noch nicht abgeschlossen sind Untersuchungen zum Einfluß der Kristallorientierung auf das Kriechverhalten von SC 16 bei 950 °C und 200 MPa Anfangsspannung.

7.2 Vergleich des Kriechverhaltens von IN 738 LC und SC 16 [001]

Ein charakteristisches Verhalten bei 950 °C und niedrigen, an die Betriebsbedingungen angenäherten Anfangsspannungen zwischen 120 MPa und 200 MPa zeigt *Abb. 7.1*. Zusammen mit der Auftragung der Kriechgeschwindigkeit über Zeit (*Abb. 7.2*) ist die ausgeprägte höhere Kriechfestigkeit von SC 16 [001] gegenüber IN 738 LC zu erkennen. Insbesondere bei höheren Spannungen treten für SC 16 deutlich größere plastische Dehnungen (bis Faktor 8) bis zum Bruch auf. IN 738 LC weist Bruchdehnungen zwischen ein und vier Prozent, SC 16 [001] erreicht Dehnungen von 16 bis 35 Prozent bei 200 MPa. Bei 850 °C und 950 °C traten bei [001]-nah orientierten Proben keine nennenswerten elliptischen Querschnitte auf. Bei Proben aus der Mitte des Orientierungsbereiches wurden hingegen ausgeprägte Ovalisierungen gemessen, die sich in Richtung auf die [011] Kristallausrichtung verstärken und Ellipsenformzahlen bis 1,5 erreichten, die deutlich höher liegen, als die an Zugproben gemessenen Werte (vgl. Kap. 5.2).

Generell läßt sich aussagen, daß die Kriechgeschwindigkeit $\dot{\epsilon}$ von IN 738 LC zu Beginn des Versuchs eine Größenordnung höher liegt als die von SC 16 [001], *Abb. 7.3*. Bei einer Anfangsspannung von 120 MPa ist die minimale Kriechgeschwindigkeit auch nach 900 Stunden noch nicht erreicht. In bezug auf die akkumulierte Dehnung, tritt die minimale Kriechgeschwindigkeit $\dot{\epsilon}$ für beide Werkstoffe im Bereich zwischen 0,1 und 1,2 Prozent auf. Die hohe Anfangsdehnungsgeschwindigkeit von IN 738 LC und die geringere Duktilität sind die Ursachen für die kurzen Bruchzeiten im Vergleich mit SC 16 [001].

Die Ergebnisse aller Kriechversuche bei 950 °C für IN 738 LC und SC 16 [001] sind in *Abb. 7.4* als Abhängigkeit der Ein- und Vier-Prozent-Zeitdehnungen von der Anfangsspannung dargestellt. Die Ergebnisse der Zeitdehnungen liegen jeweils in einem engen Streuband. Der Vorteil von SC 16 [001] gegenüber IN 738 LC wird deutlich sichtbar. Die Vier-Prozent-Zeitdehnung liegt, sofern sie erreicht wird, unterhalb der Ein-Prozent-Zeitdehnung von SC 16 [001]. Die Laufzeit bis ein Prozent bzw. vier Prozent plastischer Dehnung wird um den Faktor 2,5 erhöht.

Die Deformationsmechanismen während des Kriechens sind beim SC 16 teilweise mit den Deformationsmechanismen im Zugversuch identisch [16, 17, 18, 19, 20]. Dabei können jedoch infolge des Temperatur- und Spannungsbereiches verschiedene Mechanismen vorherrschen. Im Gegensatz hierzu sind jedoch mehrere Deformationsmechanismen bekannt, die nur im Kriechversuch auftreten können. Dies betrifft einmal die Aktivierung der $\{111\} \langle 112 \rangle$ Gleitsysteme und zum ande-

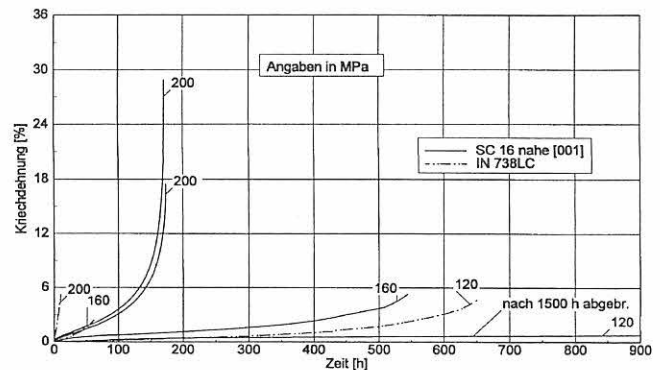


Abb. 7.1:
Kriechverlauf von IN 738 LC und SC 16 [001] bei 950 °C, $\sigma < 200$ MPa

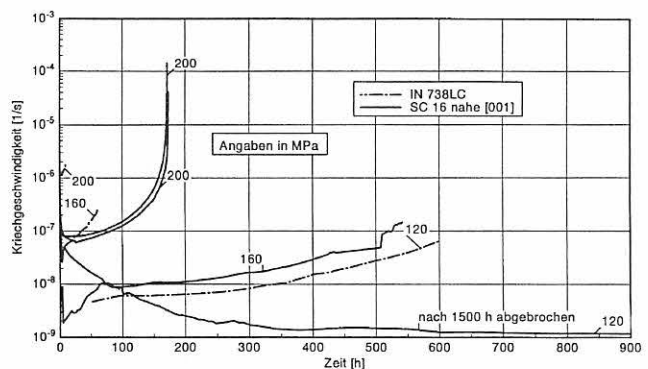


Abb. 7.2:
Entwicklung der Kriechgeschwindigkeit $\dot{\epsilon}$ von IN 738 LC und SC 16 [001] als Funktion der Zeit bei 950 °C, $\sigma < 200$ MPa

ren eine Veränderung der Morphologie der γ' -Teilchen und deren Größe. Nach Belasten der Probe hängt das Kriechverhalten stark von der Dichte und Anordnung der eingewachsenen Versetzungen ab, da noch keine Mechanismen der Versetzungsmultiplikation wirksam sind. Der primäre Kriechbereich wird beim SC 16 besonders durch das Schneiden der γ' -Phase mittels der $\{111\} a/3 \langle 112 \rangle$ Gleitsysteme bestimmt [6, 21, 22]. Im Bereich mit minimaler Kriechgeschwindigkeit kommt jedoch das Quergleiten $\{001\} \langle 111 \rangle$, von Schraubenversetzungen in den γ/γ' -Phasengrenzen hinzu.

Zwei Aspekte des kubischen Quergleitens haben einen gegenläufigen Einfluß auf die Kriechgeschwindigkeit: Kubisches Quergleiten führt zu einer höheren Versetzungsbeweglichkeit, da die Versetzungen nicht mehr an die $\{111\}$ -Gleitebenen gebunden sind. Die hohe Versetzungsbeweglichkeit führt zur Beschleunigung des Kriechens, was auch tatsächlich festgestellt wird. Andererseits bringt die Beweglichkeit der Versetzungen die Möglichkeit zu Wechselwirkungen und Reaktionen mit sich, die zu unbeweglichen Versetzungsanordnungen führen können.

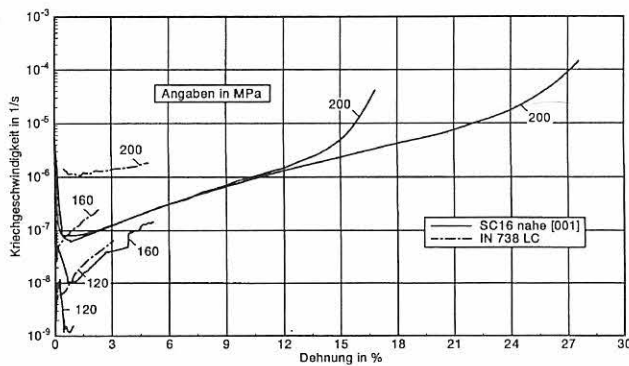


Abb. 7.3: Entwicklung der Kriechgeschwindigkeit ϵ von IN 738 LC und SC 16 [001] als Funktion der Zeit bei 950 °C, $\sigma < 200$ MPa

Bei Gefügeuntersuchungen an den kriechverformten Proben des Werkstoffs IN 738 LC wurden keine Gleitbänder beobachtet. Die Kriechverformung wird durch das Gleiten der Versetzungen in der Matrix, durch das Klettern und das anschließende Gleiten der Stufenversetzungen bzw. durch das Quergleiten und anschließende Gleiten

Tabelle 2: Ergebnisse von [001]nahen und [011]nahen SC 16 Proben bei 950 °C

Probe	Θ	ρ	Orient.	σ	Zeit bis $\epsilon=1\%$	Zeit bis $\epsilon=2\%$	Zeit bis $\epsilon=4\%$	t_{Bruch}	$\dot{\epsilon}_{\text{min}}$	ϵ bei $\dot{\epsilon}_{\text{min}}$
A	4,5°	24,9°	[001]	135 MPa	602 h	1048 h	1212 h	1367 h	$2,6 \cdot 10^{-9} \text{s}^{-1}$	0,80%
B	6,4°	35,8°	[001]	200 MPa	33 h	71 h	117 h	173 h	$6,1 \cdot 10^{-8} \text{s}^{-1}$	0,93%
C	38,5°	4,0°	[011]	135 MPa	615 h	646 h	667 h	687 h	$1,7 \cdot 10^{-9} \text{s}^{-1}$	0,26%
D	38,0°	3,7°	[011]	200 MPa	76 h	106 h	124 h	130 h	$2,4 \cdot 10^{-8} \text{s}^{-1}$	0,25%
E	2,4°	–	[001]	150 MPa	254 h	551 h	720 h	849 h	$6,7 \cdot 10^{-9}$	0,25%
F	36,1	15,4	[011]	150 MPa	244 h	272 h	288 h	304 h	$5,6 \cdot 10^{-9}$	0,29%

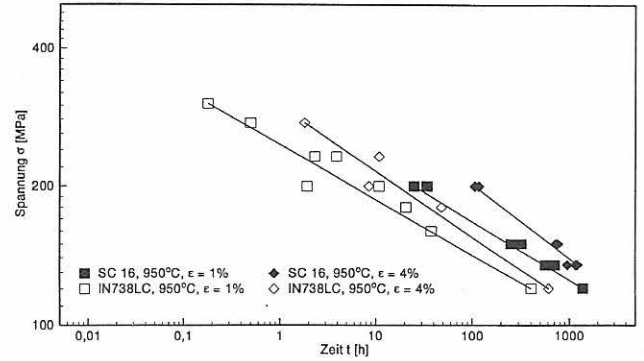


Abb. 7.4: Ein-Prozent- und Vier-Prozent-Zeitdehnungsgrenzen für IN 738 LC und SC 16 [001] bei 950 °C

der Schraubenversetzungen über die γ' -Ausscheidungen verursacht. Nach diesem Verformungsmechanismus wird die sekundäre Kriechdehnungsgeschwindigkeit durch Versetzungsklettern kontrolliert. Das bedeutet, daß die sekundäre Kriechdehnungsgeschwindigkeit sehr stark von der Temperatur sowie von der Kriechspannung abhängig ist. Ihre Beziehung kann durch die Norton-Gleichung beschrieben werden. Bei konstanter Temperatur nimmt die Kriechdehnungsgeschwindigkeit mit zunehmender Kriechspannung zu. Die Kriechdehnungsgeschwindigkeit nimmt auch bei einer bestimmten Kriechspannung mit steigender Temperatur zu, da höhere Temperatur und höhere Kriechspannung den Kletterprozeß begünstigen.

7.3 Abhängigkeit der Kriech-eigenschaften von der Kristallorientierung des SC 16 bei 950 °C

In einer ersten Versuchsreihe sollte der Einfluß der Kristallorientierung auf die Kriechneigung von SC 16 untersucht werden. Die Versuchsserie ist noch nicht abgeschlossen. In den Abb. 7.5 und 7.8 sind die Ergebnisse von [001]-nahen und [011]-nahen Proben bei 980 °C und einer Spannung von 135 MPa bzw. 200 MPa gezeigt. Die Ergebnisse sind ebenso der Tabelle 2 zu entnehmen. Der Kurvenverlauf mit einem ausgeprägten Kriechratenminimum entspricht dem bei anderen, hoch γ' -haltigen Einkristalllegierungen beobachteten. Es lie-

gen bei [011]-naher Kristallorientierung niedrigere Zeitstandfestigkeitswerte vor. Orientierungsabhängige Unterschiede im Kurvenverlauf sind bei den mit 200 MPa belasteten Proben in den Werten der Kriechratenminima $\dot{\epsilon}_{\min}$ zu erkennen. Bei [011]-naher Kristallorientierung ist dieser niedriger als bei [001]-naher Kristallorientierung. Der Unterschied beträgt nahezu eine Größenordnung. Weiterhin liegt das Kriechratenminimum bei gleicher Kristallorientierung bei ähnlichen Dehnungen. Hier ist also weniger eine Spannungsabhängigkeit als eine Orientierungsabhängigkeit festzustellen.

Der Wert für die Ein-Prozent-Dehngrenze ist bei 135 MPa für beide Orientierungen nahezu identisch. Bei 200 MPa und [011] Kristallorientierung ist Ein-Prozent-Dehnung nach etwa doppelter Zeit im Vergleich zu [001] erreicht. Eine umfangreichere Darstellung des Orientierungseinflusses auf das Verformungsverhalten

bei 950 °C und einer Anfangsnennspannung von 135 MPa und 200 MPa zeigen die Abb. 7.8 und 7.9. Die Lage der Proben ist den Standardorientierungsdreiecken in Abb. 7.10 und 7.11 zu entnehmen. Die [001]-nahen SC 16 Proben hüllen alle anderen Proben mit abweichenden theta/rho-Winkeln ein.

Die Ergebnisse der im wesentlichen in der Mitte des Orientierungsdreiecks angesiedelten Proben sind sehr komplex und lassen sich nicht ohne weiterführende Untersuchungen interpretieren. Ansätze bieten die von Sass et. al. [23] für CMSX-4 veröffentlichten Ergebnisse, die bezüglich des Orientierungsdreiecks gute und schlechte Kriecheigenschaften fanden. Einzuschließen in die Auswertungen sind detaillierte Untersuchungen hinsichtlich der wirksamen Verformungsmechanismen.

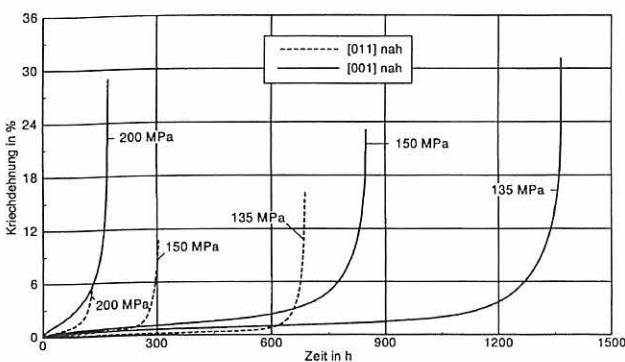


Abb. 7.5: Einfluß der Kristallorientierung auf die Kriechdehnung ϵ , SC 16 [001] und [011]

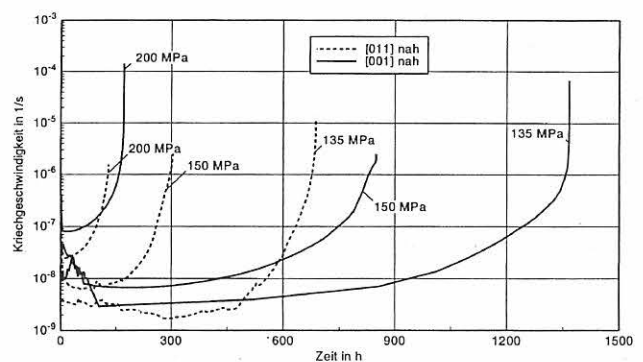


Abb. 7.6: Einfluß der Kristallorientierung auf die Kriechgeschwindigkeit $\dot{\epsilon}$, SC 16 [001]

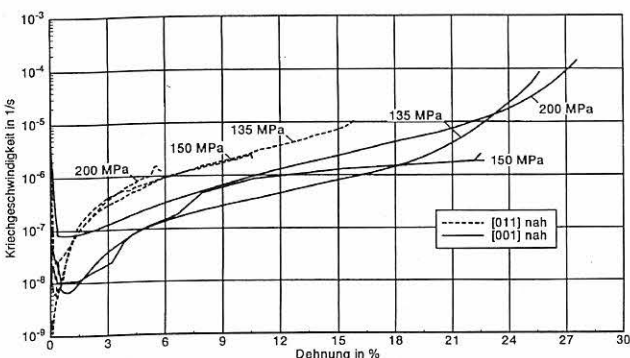


Abb. 7.7: Kriechverhalten unterschiedlich orientierter SC 16-Proben bei 950 °C, 200 MPa

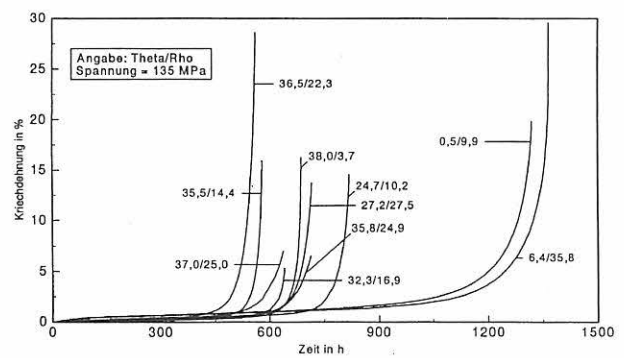


Abb. 7.8: Kriechverlauf von unterschiedlich orientierten SC 16-Proben (Abb. 7.10) bei einer Spannung von 135 MPa, $T = 950$ °C

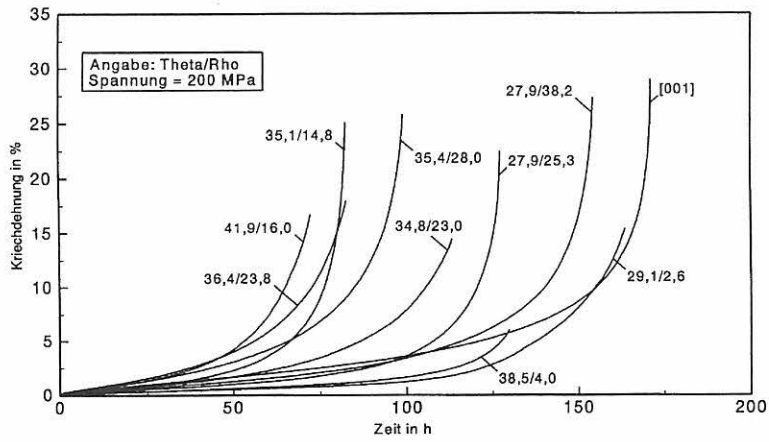


Abb. 7.9:
Kriechverlauf von unterschiedlich orientierten SC 16-Proben (Abb. 7.10) bei einer Spannung von 200 MPa, $T = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$

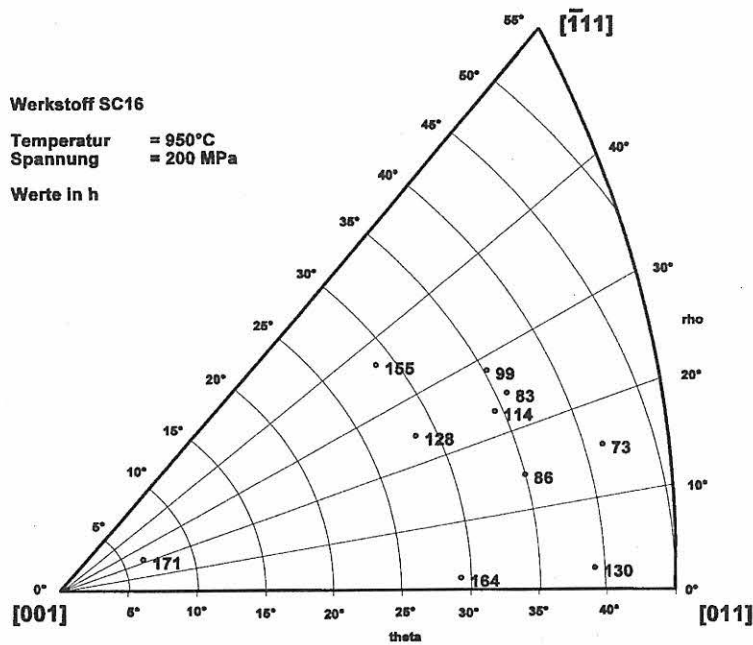


Abb. 7.10:
Orientierungen der verwendeten SC 16-Proben zur Prüfung bei 135 MPa, $T = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$

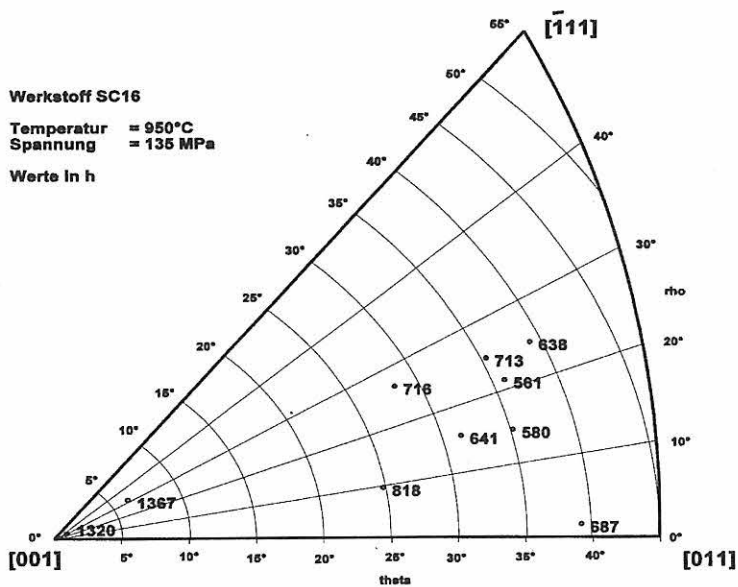


Abb. 7.11:
Orientierung der verwendeten SC 16-Proben zur Prüfung bei 200 MPa, $T = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$

8 Das thermo-mechanische Spannungs-Dehnungs-Verhalten von IN 738 LC

Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von IN 738 LC unter TMF-Belastung für reine Zug-Druck- und reine Torsionsbeanspruchung wurde in [1, 20] für die thermischen Pfade „IP“ (In Phase), „90°OP“ (Out of Phase) als auch „180°OP“ beschrieben. Desgleichen wurde über mehraxiale Zug-Druck-Torsionsversuche mit Proportionalität der vorgegebenen axialen und torsionalen Dehnungskomponenten und thermischen Pfaden wie oben berichtet.

8.1 Experimente

Das Versuchsprogramm wurde mit der Intention zunehmender Nichtproportionalität fortgeführt:

- Phasenwinkel $\Psi_m = 0$ zwischen ε_m und $\gamma/\sqrt{3}$ (mechanisch proportional) und zwischen ε_m , $\gamma/\sqrt{3}$ und T wird der Phasenwinkel $\Psi_T = 90^\circ$ (thermischer Karopfad bei Dreiecksfunktionen über der Zeit).
- Phasenwinkel $\Psi_m = 90^\circ$ zwischen ε_m und $\gamma/\sqrt{3}$ (Karopfad), $\Psi_T = -90^\circ$ zwischen ε_m und T , woraus sich zwischen $\gamma/\sqrt{3}$ und T mit 180° ergibt.
- Mit gleichem Phasenwinkel wie oben, jedoch statt Dreiecksfunktionen nun sinusoidale Zeitfunktionen.
- Der betriebsnahe Zyklus, allerdings mit Proportionalität zwischen ε_m und $\gamma/\sqrt{3}$, d. h. mit $\Psi_m = 0$.

Eine Übersicht zu den durchgeführten Versuchen gibt *Tabelle 3*.

8.2 Ergebnisse und Diskussion

Das Spannungs-Dehnungsverhalten der Proben infolge proportionaler axialer und torsionaler Belastung bei $\dot{\varepsilon} = 10^{-4} \text{s}^{-1}, 10^{-5} \text{s}^{-1}$ und thermisch 90°OP (Karopfad) zwischen 450°C und 950°C ist ähnlich dem Verhalten isothermer Versuche mit $T = 650^\circ \text{C}$ und sonst gleichen Versuchsparametern, *Abb. 20 a*. Das Durchlaufen des Weges von $700^\circ \text{C} \rightarrow 450^\circ \text{C} \rightarrow 700^\circ \text{C}$ entspricht dem isothermen Verhalten bei $T < 750^\circ \text{C}$ einschließlich der Extremalspannungen. Erst für $T > 750^\circ \text{C}$ treten thermisch aktivierte inelastische Verformungsprozesse auf, indem zeitabhängige Kriechanteile zunehmen. Deutlich wird dieser Prozeß längs des Weges von $850^\circ \text{C} \rightarrow 950^\circ \text{C} \rightarrow 900^\circ \text{C}$, dessen σ/ε -Verhalten dem isothermen Verhalten von $T = 950^\circ \text{C}$ nahekommt. Mit abnehmender Temperatur ($T \approx 800^\circ \text{C}$) stellt sich jedoch sehr schnell das isotherme σ/ε -Verhalten von $T < 750^\circ \text{C}$ ein. Bei $\dot{\varepsilon} = 10^{-5} \text{s}^{-1}$ und sonst gleichen TMF-Parametern folgt im Druckspannungsextremum und im Hochtempera-

turbereich um $T = 950^\circ \text{C}$ eine Zunahme zeitabhängiger inelastischer Deformationen, was unter Dehnungsregelung eine Spannungsrelaxation bedeutet. Die Versagenszyklenzahl N_f dieses Versuches ist etwa um den Faktor 3 größer als die des Versuches mit $\dot{\varepsilon} = 10^{-4} \text{s}^{-1}$, vgl. *Tabelle 3*. Die Ergebnisse des gleichen Versuches im Temperaturbereich $450^\circ \text{C} < T < 760^\circ \text{C}$ zeigen keine erkennbaren Änderungen des σ/ε -Verlaufes infolge veränderlicher Temperatur gegenüber isothermen Versuchen mit äquivalenten Parametern bei $T = 650^\circ \text{C}$, *Abb. 8.1 b*.

Bei einem Phasenwinkel $\Psi_m = 90^\circ$ zwischen ε_m und $\gamma/\sqrt{3}$ und einem Phasenwinkel $\Psi_T = 90^\circ$ zwischen ε_m und T erreichen die vorgegebenen axialen Dehnungen ihre Maxima bei $T = 450^\circ \text{C}$ und ihre Minima bei $T = 950^\circ \text{C}$. Die Extrema der torsionalen Dehnungen liegen bei der Mitteltemperatur $T = 700^\circ \text{C}$. Die Dehngeschwindigkeit beträgt $\dot{\varepsilon} = 10^{-4} \text{s}^{-1}$. Die Axialspannung σ beginnt in der Heizphase bei $T = 850^\circ \text{C}$ zu relaxieren. Die Spannungsabnahme beträgt bei $T = 950^\circ \text{C}$ etwa 150 MPa gegenüber dem Maximum. Nahezu lineares Verhalten mit stabiler Verfestigung (quasi-isotherm) stellt sich während der Abkühlphase ein. Die Schubspannungsantwort zeigt in der Heizphase stabile Verfestigung bei $T = 700^\circ \text{C}$ und beginnende Verfestigung im Druckbereich gegen $T = 950^\circ$. Mit der T - und ε_m -Umsteuerung geht diese Verfestigungsphase unster über in einen linearen Verlauf bis $T = 700^\circ \text{C}$. Es ist hier zu beobachten, daß die Umsteuerung einer Dehnungskomponente eine Unstetigkeit im Spannungsverlauf der anderen erzeugt. Man kann daher auf eine Interaktion verschiedener Verformungsmechanismen schließen, *Abb. 8.2 a*. Diese Charakteristik kommt z. B. bei austenitischem Stahl 800 H in sehr viel ausgeprägterer Form vor.

Die vorgegebene sinusoidale Zeitfunktion der axialen und torsionalen Dehnungen sowie der Temperatur lassen die oben beschriebenen Unstetigkeiten der Spannungsantworten als Folge schneller Umsteuerungen in den ansonsten ähnlichen Spannungsverläufen verschwinden, *Abb. 8.2 b*. Der wesentliche Unterschied besteht jedoch in der größeren Spannungsrelaxation der Normal- und Schubspannungen bei extremalen Dehnungen insbesondere im Hochtemperaturbereich um $T = 950^\circ \text{C}$. Die damit verbundenen zeitabhängigen inelastischen Dehnungsanteile sind eine Folge größerer Verweilzeiten in Bereichen geringer Dehngeschwindigkeit der Dehnungskomponenten in den Scheitelpunkten der sinusoidalen Zeitfunktionen. Den Vergleich des mechanischen Karo- und Kreispfades unter veränderlicher Temperatur mit Ergebnissen aus isotherm geführten Versuchen mit

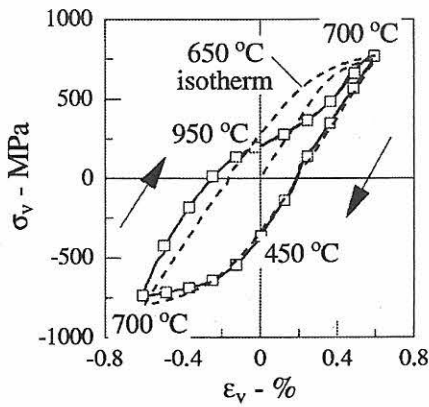
Tabelle 3: TMF-Versuchsprogramm, Versagens-Lastspielzahlen

Temperatur °C			Temperatur Rate °C s ⁻¹		Phasenwinkel °		$\Delta\varepsilon_m$	N _f				t _{hzt}	
T ₀	T ₁	T ₂	$\dot{\varepsilon}=10^{-4}\text{s}^{-1}$	$\dot{\varepsilon}=10^{-5}\text{s}^{-1}$	Ψ_T	Ψ_m		$\dot{\varepsilon}=10^{-4}\text{s}^{-1}$		$\dot{\varepsilon}=10^{-5}\text{s}^{-1}$			
TMF - axial													
								Ψ_T	0°	180°	0°	180°	
700	950	450	4.17	42	0; 180	-	1.2	9	9	4	16		
725	850	600	2.08	0.21	0; 180	-	1.2	20	6	12	9	-	
650	750	550	1.67	0.17	0; 180	-	1.2 ¹	35	25	20	7	-	
700	950	450	4.17	-	0; 180	-	1.0	15	35	-	-	-	
700	950	450	4.17	-	0; 180	-	0.8	45	100	-	-	-	
								Ψ_T	-90	+90	-	-	
450	950	450	4.17	-	-90	-	1.2	44	-	-	-	-	
950	450	950	4.17	-	+90	-	1.2	-	8	-	-	-	
600	850	600	2.08	-	-90	-	1.2	20	-	-	-	-	
850	600	850	2.08	-	+90	-	1.2	-	44	-	-	-	
TMF-torsional			$\gamma/\sqrt{3} = \dot{\varepsilon}$		Ψ_T			0°	±90°	0°	±90°		
700	950	450	4.17	0.42	0; 90	-	1.2	15	20	8	20	-	
605	760	450	2.58	0.26	0; 90	-	1.2	50	100	17	90	-	
TMF- axial + torsional, mechanisch proportional													
700	950	450	4.17	0.42	0	0	1.2	9	-	9	-	-	
605	760	450	2.58	0.26	0	0	1.2	100	-	15	-	-	
950	450	950	4.17	0.42	90	0	1.2	-	70	-	45	-	
760	450	760	2.58	0.26	90	0	1.2	-	3	-	34	-	
700	450	950	4.17	-	-90	0	1.2	-	22	-	-	-	
700	950	450	4.17	-	+90	0	1.2	-	23	-	-	-	
TMF - axial + torsional, mechanisch nichtproportional								$\varepsilon_m^{(h)}$		lin.	sin.	lin.	sin.
700	450	950	4.17	-	180	+90	1.2	9	4	-	-	-	
700	450	950	4.17	-	180	+90	1.0	-	8	-	-	-	
700	450	950	4.17	-	180	+90	0.8	-	9	-	-	-	
725	600	850	-	2.08	180	+90	1.2	-	-	25	19	900	
TMF-komplex axial								$\Delta\varepsilon_m$		1.24	0.93	0.62	-
450	950	450	4.2	-	kompl.	-	-	8	100	670	-	-	
TMF-komplex axial + torsional mechanisch proportional													
450	950	450	4.2	-	kompl.	0	-	19	100	700	-	-	
450	950	450	4.2	-	kompl.	0	-	14	63	-	-	360	

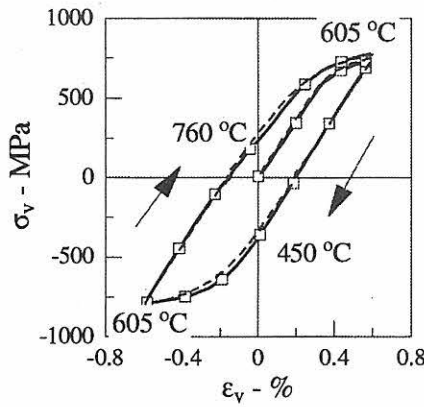
T = 950 °C und T = 450 °C zeigt *Abb. 8.2 c*. Zunächst stimmen die Spannungspunkte der TMF-Versuche bei den Extremaltemperaturen mit denen der isotherm geführten Versuche überein. Weiter läßt das Diagramm erkennen, daß oberhalb einer Temperaturschwelle von ca. T = 700 °C thermisch aktivierte Verformungsmechanismen, die zeitabhängige inelastische Deformationen zur Folge haben, die sich bei dehnungsgeregelten Versuchen durch Spannungsrelaxation äußern, zum Tragen kommen. Für T < 700 °C kann das σ/ε -

Verhalten auch für TMF-Last als unabhängig von der Temperatur angesehen werden.

In *Abb. 8.3* ist die Simulation des thermo-mechanischen Verhaltens eines Volumenelements der Anströmkante einer gekühlten Gasturbinenschaufel dargestellt. Ein Zyklus umfaßt den Anfahr-, Betriebs- und Abfahrvorgang der Turbine [21]. Die vorgegebenen Temperatur- und Dehnungsintervalle sowie die Dehngeschwindigkeiten des im folgenden mit „komplex“ bezeichneten



a: $\Delta T = 950\text{ }^\circ\text{C} - 450\text{ }^\circ\text{C}$



b: $\Delta T = 760\text{ }^\circ\text{C} - 450\text{ }^\circ\text{C}$

Abb. 8.1:
Vergleich des 90° OP TMF-
Versuchs mit dem LCF-
Versuch, beide proportional
mehraxial $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

Zyklus wurden zwecks Vergleich mit „einfachen“
Zyklen modifiziert [22]. Im angeführten Beispiel wird
der Zyklus proportional mit gleich großen axialen und
torsionalen Dehnungskomponenten durchlaufen.

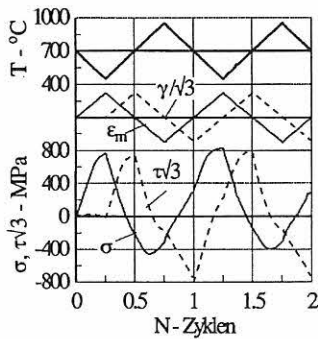
Der in Abb. 8.3 dargestellte mehraxiale Spannungs/
Temperaturverlauf ist die Antwort auf die im vierten
Diagramm der Abb. 8.5 a skizzierten Dehnungsvor-
gabe. Wie bei allen bisher beschriebenen Versuchen
liegen die Beträge der Schubspannungen um etwa 100
MPa über denen der Normalspannungen. Die aus σ und
 τ nach v. Mises gerechneten äquivalenten Größen σ/ϵ
werden der Übersichtlichkeit wegen im folgenden in
„vorzeichenmodifizierter“ Form σ_v/ϵ_v , d. h. Zug- und
Druckspannungsbereichen zugeordnet, aufgetragen, vgl.
Abb. 8.1a und b; 8.4; 8.5; 8.9. Die größten Beträge der
Spannungen treten nach der Aufwärmphase im Druck-
bereich und nach der Abschaltphase im Zugbereich auf.

Aus Abb. 8.4 wird ersichtlich, daß die Vergleichsspan-
nungen σ_v bei $\Delta\epsilon_v$ etwa gleich groß sind. Am Grund-
lastpunkt liegen sie bei $\Delta\epsilon_v = 1,24$ Prozent und $\Delta\epsilon_v =$

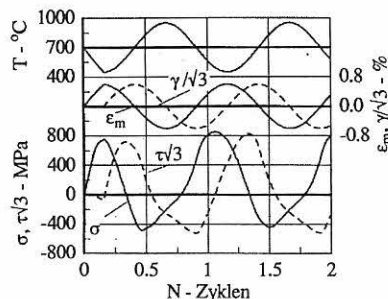
0,93 Prozent im Bereich $0 < \sigma_v < 100$ MPa und bei
 $\Delta\epsilon_v = 0,60$ Prozent wird $\sigma_v \approx +150$ MPa.

Bemerkenswert ist weiterhin, daß die in der Druckpha-
se bis $T = 600\text{ }^\circ\text{C}$ (Aufwärmen) aufgebauten inela-
stischen Dehnungen hauptsächlich bei der Zugbelas-
tung nach dem Grundlastpunkt wegen der höheren
Temperatur $T = 950\text{ }^\circ\text{C}$ durch thermoinduzierte
Kriechdeformation selbst bei niedrigen Spannungen
abgebaut werden. Dieser Vorgang bewirkt die Zunahme
der Spannungsasymmetrie bei Abnahme der Dehn-
schwingweite $\Delta\epsilon_v$, Abb. 8.4.

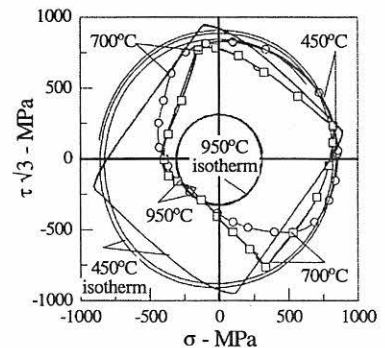
Zum Nachweis der Gültigkeit der J_2 -Theorie nach v.
Mises dient als Referenzversuch der zu mehraxialen
Versuchen äquivalente Zug-Druck-Versuch gleicher
Frequenz und Phasenlage der mechanischen und ther-
mischen Vorgabegrößen. Für die Versuchstypen
„Torsion“, „Zug-Druck + Torsion“, beide thermisch IP
und 180° OP und mechanisch IP sowie den „komplexen“
Typus mechanisch IP konnte die v. Mises Hypo-
these durch Vergleich verifiziert werden, Abb. 8.5.



a: $\epsilon_m(t)$ und $\gamma/\sqrt{3}(t)$ partiell linear



b: $\epsilon_m(t)$ und $\gamma/\sqrt{3}(t)$ sinusoidal



c: Vergleich

Abb. 8.2: Vergleich der mech. 90° OP-TMF-Versuche mit sinusoidalen und linearen Vorgabefunktionen $f(t)$ sowie mit äquivalenten
isotherm geführten Versuchen der Extremaltemperaturen $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$

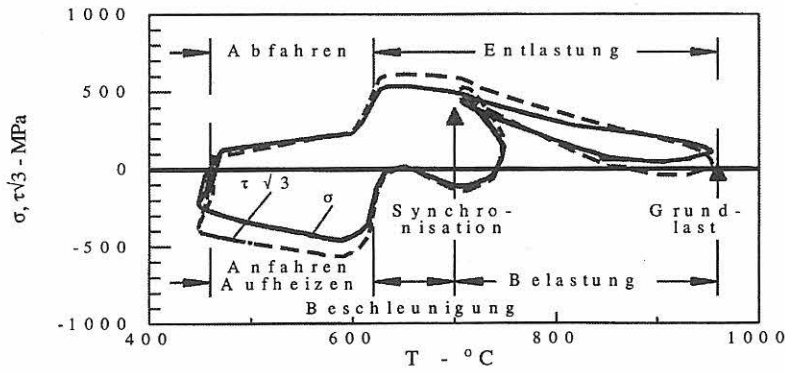


Abb. 8.3:
Werkstoff-Antwort des in ϵ_m/T „Komplex“
geführten TMF-Simulations-Versuches
eines Turbinenarbeitszyklus $\epsilon_v = 1,24\%$,
 $\dot{\epsilon} = 10^{-4} s^{-1}$

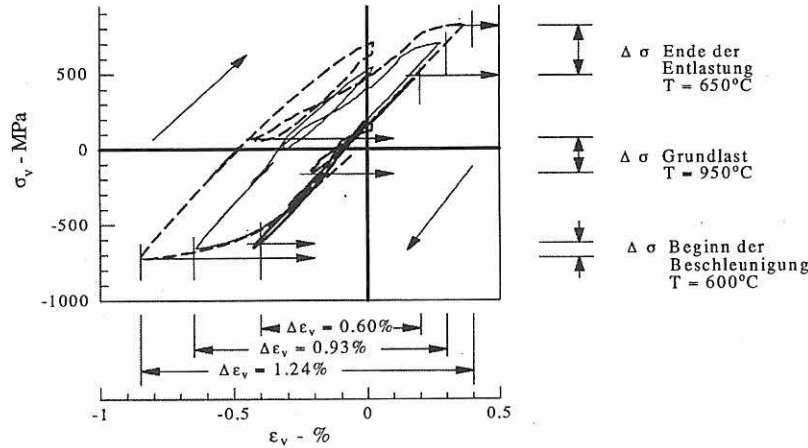


Abb. 8.4:
Spannungs-Abhängigkeit von der Dehnschwingweite

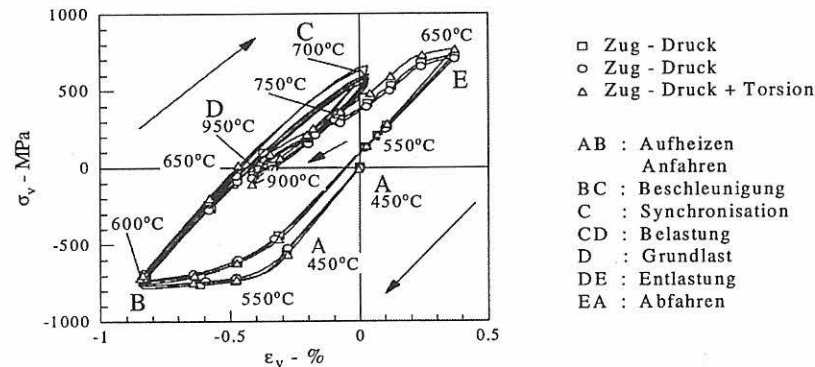


Abb. 8.5:
Experimentelle Verifikation der J_2 -Theorie
am Beispiel des „komplexen“ ϵ_m/T -Pfades

Lebensdaueranalysen wurden für fünf Versuchstypen unter Variation der Dehnschwingweite $\Delta\epsilon$, Abb. 8.6 a, im Temperaturbereich $450\text{ °C} < T < 950\text{ °C}$ durchgeführt. Die inelastische Arbeit W^{ine} des Zyklus bei $N_f/2$, modifiziert mit dem Multiaxial-Faktor MF nach Manson/Halfort [23], wurde doppellogarithmisch über N_f aufgetragen. Als Versagenszyklenzahl N_f wird diejenige bestimmt, deren Zyklus im Wechselspannungsdiagramm $\Delta\sigma$ IN eine Abweichung von ein Prozent bezüglich der Näherungsgeraden des Sättigungsbereiches aufweist. Im Diagramm W^{ine}/N_f (Abb. 8.6 b) liegt das Punktefeld aller Versuche innerhalb eines Streubandes mit dem Breitenfaktor von 1.7 bei einer Steigung aus der

linearen Regression über alle Punkte. Damit läßt sich der exponentielle Zusammenhang

$$W^{ine} = \text{Summe MF } \sigma_{ij} \Delta\epsilon_{ij}^{ine} = A N_f^m$$

mit m als Steigung und A als Achsabschnitt hinschreiben, Abb. 8.6 b.

Die mit dieser Beziehung ermittelten Versagenszyklenzahlen N_f^{sim} , doppellogarithmisch über den experimentell ermittelten N_f^{exp} aufgetragen, liefern im Fehlerdiagramm, Abb. 8.6 c, die Punkte aller betrachteten Lastpfade, die innerhalb eines Streubandes mit dem Breitenfaktor von 2.0 liegen. Die Resultate – insbeson-

dere das des sinusoidal geführten TMF-Versuchs – weisen darauf hin, daß mehraxiale Belastung eine größere Arbeitsaufnahme bei sinkender Lebensdauer zur Folge

hat. Der Mehraxialfaktor M_F erlaubt es, die Korrelation zwischen Arbeit und Lebensdauer durch zwei Kenngrößen – A und m in (1) – zu beschreiben.

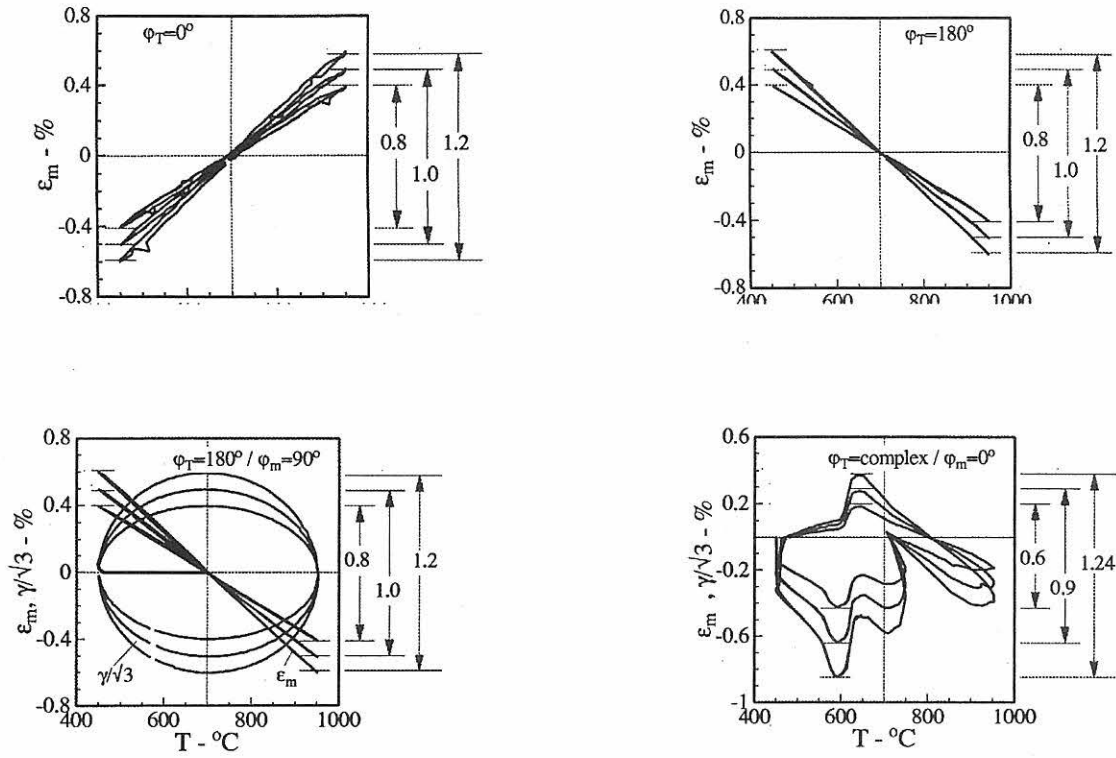


Abb. 8.6a: zur Identifikation verwendete ϵ_m/T -Pfade

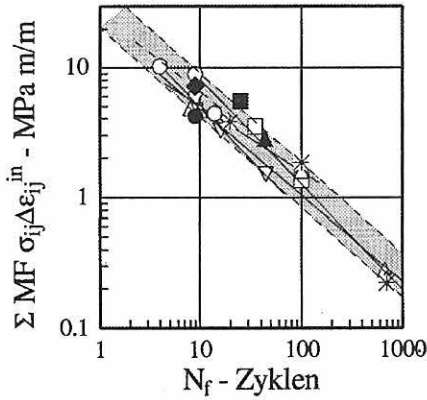


Abb. 8.6b: Bestimmung von A , m aus Id.-Versuchen

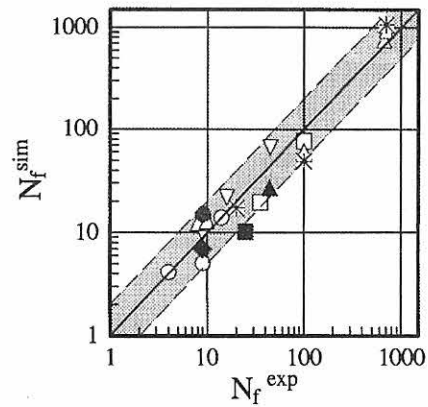


Abb. 8.6c: Verifikation von A , m

Identifikationsversuche

- Zug-Druck
- ▽ $\Psi_T = 0^\circ$
- $\Psi_T = 180^\circ$
- △ $\Psi_T = \text{kompl.}$

Zug-Druck+Torsion

- * $\Psi_T = \text{kompl.}$
- $\Psi_T = 180^\circ, \text{ sinus}$

Verifikationsversuche

- ▲ $\Psi_T = 90^\circ, \Psi_m = -, \Delta T = 850 - 600 \text{ }^\circ\text{C}$
- ◆ $\Psi_T = 180^\circ, \Psi_m = 90^\circ, \Delta T = 950 - 460 \text{ }^\circ\text{C}$
- $\Psi_T = 180^\circ, \Psi_m = 90^\circ, \Delta T = 850 - 600 \text{ }^\circ\text{C}$
- $\Psi_T = 0^\circ, \Psi_m = 0^\circ, \Delta T = 950 - 450 \text{ }^\circ\text{C}$

Abb. 8.6: Lebensdaueranalyse axialer und mehraxialer TMF-Versuche

Eine plausible Abhängigkeit der Lebensdauer von Temperaturbereichen ΔT konnte für Zug-Druck-Versuche thermisch in Phase (IP) mit $\Delta \varepsilon_v = 1,2$ Prozent, $\dot{\varepsilon} = 10^{-4} s^{-1}$ und $10^{-5} s^{-1}$ festgestellt werden. Für die drei Temperaturbereiche 450 bis 950 °C, 600 bis 850 °C und 550 bis 750 °C sinkt die aufgenommene inelastische Arbeit in dieser Reihenfolge bei steigenden Versagenszyklenzahlen N_f . Im doppellogarithmischen Diagramm W^{inc}/N_f liegen die Wertepaare so, daß eine lineare Regression zulässig ist. Dies gilt für beide o. a. Dehngeschwindigkeiten, Abb. 8.7.

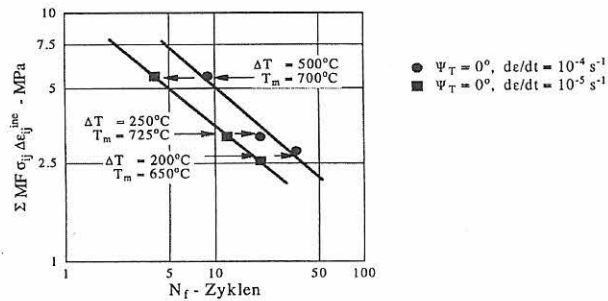


Abb. 8.7: Lebensdauer in Abhängigkeit von ΔT und ε_m unter Verwendung von W^{inc}

Diese Ergebnisse können als ein weiteres Indiz für die Zulässigkeit einer Korrelation von inelastischer Arbeit mit Anrißmechanismen gewertet werden. Allerdings soll darauf hingewiesen werden, daß das Versagen auch von den Mitteltemperaturen T_m abhängen kann. Da keine Versuche mit gezielten T_m -Variationen durchgeführt wurden, hat das vorliegende Ergebnis richtungweisenden Charakter.

Zur Simulation des Betriebsverhaltens wurde pro Zyklus bei maximaler Temperatur eine Haltezeit eingeführt. Bei „komplexen“ Pfaden entspricht dieser Punkt der Grundlast des Betriebszyklus. In den Grundlastpunkten herrschen Spannungen nahe Null. Folglich findet während der Haltezeiten kaum Spannungsrelaxation statt (ca. 10 bis 20 MPa), Abb. 8.8. Der Vergleich zwischen Versuchen mit und ohne Haltezeiten ($t_{Hzt} = 360$ s) zweier thermischer Pfade mit $\Delta \varepsilon_v = 0,93$ Prozent und $= 1,24$ Prozent ergab verkürzte Lebensdauern (N_f^{Hzt}) für Versuche mit Haltezeiten: im ersten Fall $N_f^{Hzt} = 0,7 N_f$ und im zweiten Fall $N_f^{Hzt} = 0,6 N_f$. Das Spannungs-Dehnungsverhalten wird durch Haltezeiten nicht verändert, Abb. 8.9. Das Spannungsniveau während der Haltezeiten bleibt über der Zyklenzahl konstant.

Für den „Karo“-Pfad in den Ebenen $(\gamma/\sqrt{3})/T$ (thermisch) und $(\gamma/\sqrt{3})/\varepsilon_m$ (mechanisch) wird die maximale Temperatur T_{max} bei minimalem ε_m und $\gamma/\sqrt{3} = 0$ erreicht, Abb. 8.10. Der Vergleich des TMF-Karopfadese (450 bis 850 °C, $t_{Hzt} = 900$ s) mit isothermen Karopfadese (T = 850 °C, $t_{Hzt} = 300$ s) und (T = 450 °C, ohne Haltezeit)

zeigt eine gute Übereinstimmung des TMF-Pfades mit den isothermen Pfaden des Hoch- und Niedrigtemperaturbereiches. Insbesondere die Übereinstimmung der Spannungsrelaxationen macht deutlich, daß der Relaxationsvorgang nach weniger als 300 s im wesentlichen abgeschlossen ist und die Normal- und Schubspannungsrelaxation proportional verläuft, Abb. 8.10.

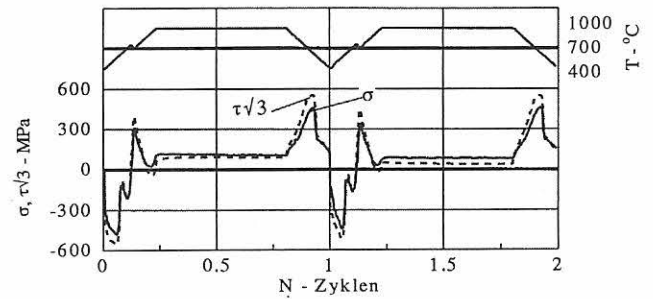


Abb. 8.8: Mehraxialer Spannungsvorlauf des „komplexen TMF-Versuchs“ mit Haltezeit $t_{Hzt} = 360$ s bei $T = 950^\circ C$

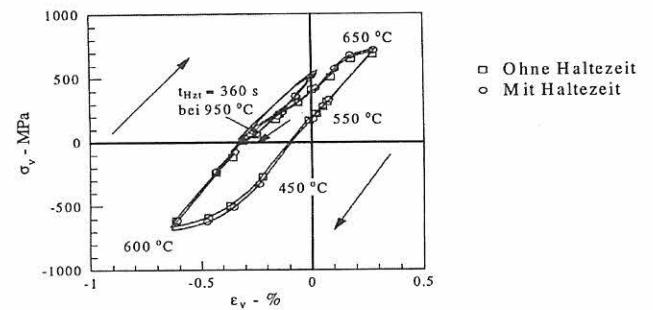


Abb. 8.9: Vergleich mehraxialer „komplexer“ Versuche mit und ohne Haltezeit

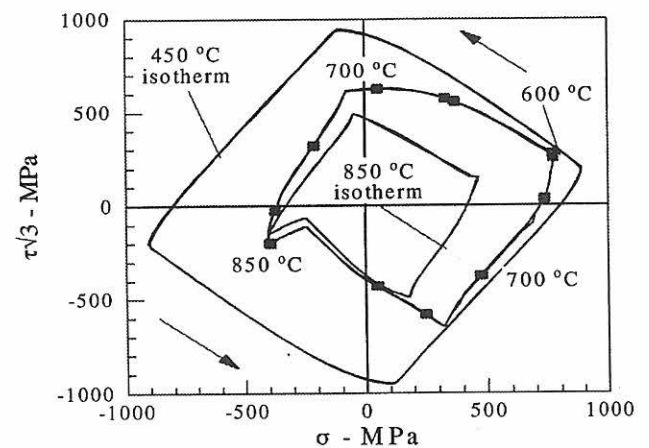


Abb. 8.10: Vergleich mehraxialer TMF-Versuche, $\Psi_m = 90^\circ$, mit äquivalenten isothermen LCF-Versuchen

9 Anisotropes und inhomogenes Verhalten von SC 16 bei unterschiedlichen Belastungspfaden

9.1 Einführung

In diesem Abschnitt soll der dominante Einfluß der Anisotropie des elastischen und besonders des plastischen Verhaltens bei zügiger, reiner torsionaler sowie zügiger und torsionaler Beanspruchung für unterschiedliche Einkristallorientierungen an Rohrproben aufgezeigt und diskutiert werden. Dabei soll die ermittelte lokale Dehnungsverteilung mittels DMS-Rosetten mit 0,8 mm Meßlänge das anisotrope und inhomogene Verformungsverhalten charakterisieren.

9.2 Experimente

Die Zug-, Torsion- und Zug-Torsionversuche wurden an Rohrproben (Wandstärke $\sim 1,2$ mm) überwiegend bei RT ausgeführt. Dazu wurden bis zu acht DMS-Rosetten mit einer Meßlänge von 0,8 mm symmetrisch bzw. asymmetrisch über den Umfang der Probe in bezug auf das Laue-Pattern aufgebracht, *Abb. 9.1*. Wenn möglich wurde zusätzlich ein Axial-Torsional-Weggeber mit einer Meßlänge von 25 mm mittels Federbelastung angeklemt.

9.3 Ergebnisse und Diskussion

9.3.1 Zugversuche [001]

In *Abb. 9.2* ist das mit Hilfe des Weggebers aufgenommene Kraft-Dehnungs-Diagramm dargestellt. Entsprechend dieser „globalen“ Dehnungsvorgabe wurde die Querverformung mittels DMS gemessen, *Abb. 9.3*. Die Abwicklung dieser Querverformung über dem Umfang ist *Abb. 9.4* zu entnehmen. Im elastischen Bereich ist die Querverformung homogen, im plastischen Bereich ist von einer stark inhomogenen Dehnungsverteilung auszugehen. Die mittels DMS-Rosetten gemessene axiale Dehnungsverteilung im elastischen und plastischen Bereich ist dagegen homogen, *Abb. 9.5*. Die mit Hilfe eines Haidenheimtasters gemessene Probenkontur (Radiusänderung) kann den *Abb. 9.6 und 9.7* (Abwicklung) entnommen werden. Die kreisförmige Ausgangskontur verformt sich im plastischen Bereich in drei „Punkten“ in Querrichtung minimal.

Bei höheren Temperaturen, $T = 950$ °C, ist die Probenkontur auch nicht mehr vollkommen kreisförmig, im Vergleich zu RT kann jedoch von einer homogenen und zum Teil nahezu isotropen Verformung ausgegan-

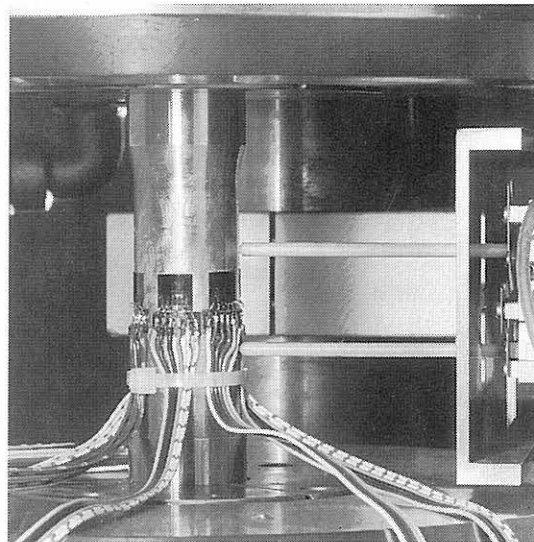


Abb. 9.1:
Rohrprobe mit DMS-Rosetten

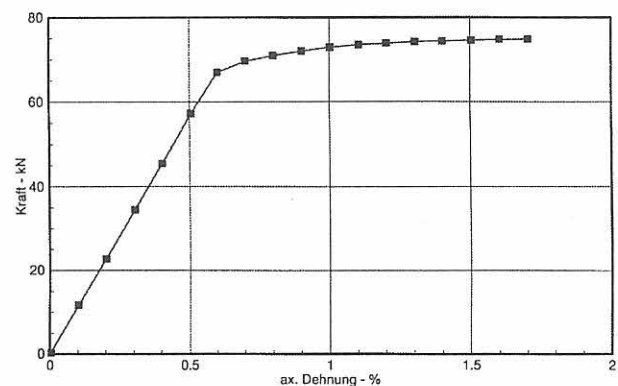


Abb. 9.2:
Kraft-Dehnungs-Diagramm für Zugversuch an [001]-orientierter Probe

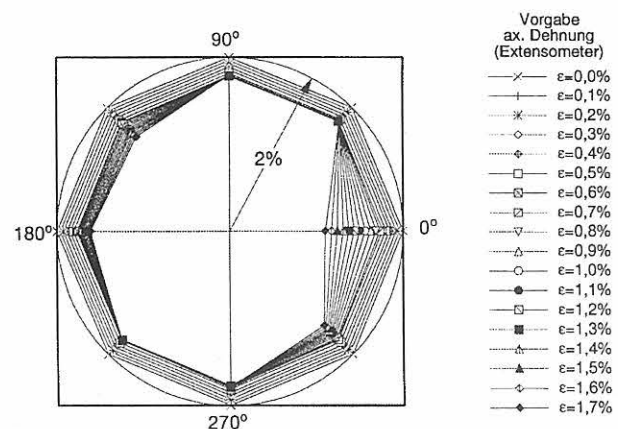


Abb. 9.3:
Querverformung beim Zugversuch an [001]-orientierter Probe in Abhängigkeit der Vorgabe der axialen Dehnung

gen werden. Die Verformung bei $T = 950\text{ °C}$ von $\epsilon = 4$ Prozent entspricht ungefähr einem Kolbenweg $s = 2,1\text{ mm}$.

Eine modellmäßige Nachbildung des plastischen Probenverhaltens im Zugversuch kann erst nach Aufdeckung der aktivierten Gleitsysteme in Angriff genommen werden.

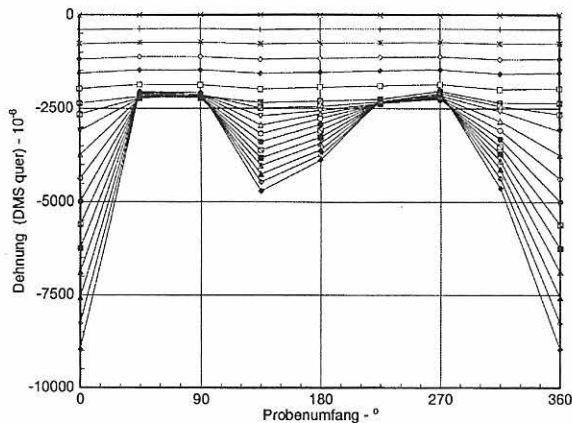


Abb. 9.4: Querverformung einer [001]-orientierten Probe bei Zugbelastung in Abhängigkeit des Umfangswinkels

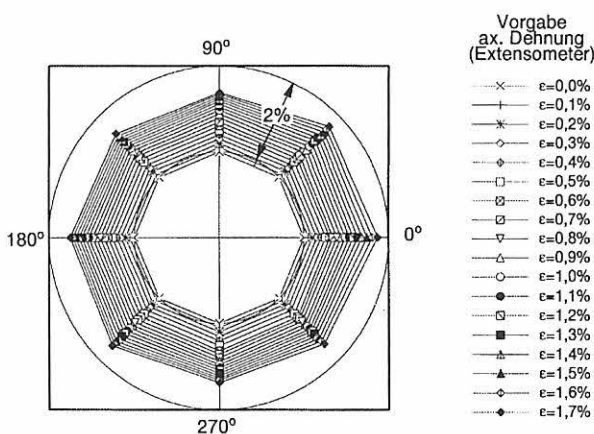


Abb. 9.5: Axiale Verformung einer [001] orientierten Probe im Zugversuch

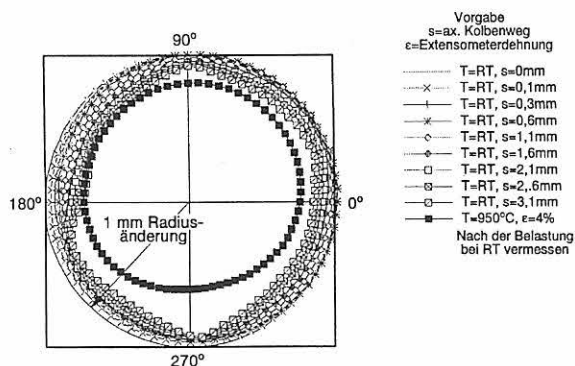


Abb. 9.6: Probenkontur einer axial belasteten Probe in Abhängigkeit von Kolbenweg bei RT und 950 °C , [001]-Orientierung

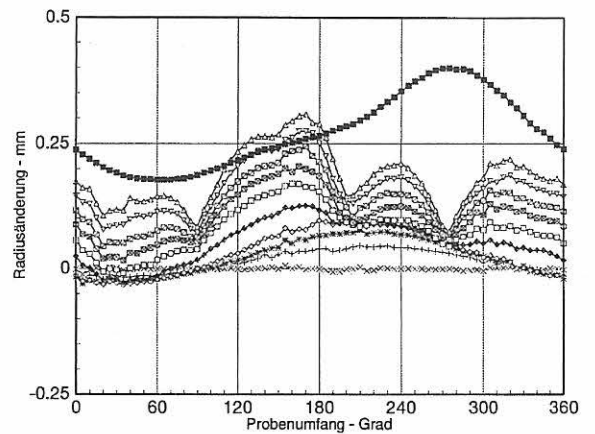


Abb. 9.7: Radiusänderung einer axial belasteten Probe in Abhängigkeit des Umfangswinkels, [001]-Orientierung

9.3.2 Torsionsversuche

Orientierung [001]

Bei Torsionsversuchen mit [001]-Orientierung erhält man über den Umfang eine inhomogene Dehnungsverteilung im plastischen Bereich. Den Abb. 9.8 und Abb. 9.9 ist zu entnehmen, daß vier „weiche“ Zonen nahe $\langle 110 \rangle$ und vier „harte“ Zonen nahe $\langle 100 \rangle$ auftreten. Dieses Verhalten ist schon von NOUAILHAS, et al., 1992, [24] festgestellt worden.

Die Interpretation eines solchen inhomogenen Verformungsverhaltens ist ebenso auf der Grundlage eines von Gleitsystemen ausgehenden mikromechanischen Modells durchgeführt worden [25-27]. Eine Simulation des Torsionsversuchs mit Oktaedergleitebenen beschrieb das Experiment nicht korrekt. Voraussetzung für eine exakte Nachbildung des Experiments war die Einführung von kubischem Gleiten, das nahe $\langle 110 \rangle$ beginnt.

Orientierung nahe [011]

In Abb. 9.10 ist die Dehnungsverteilung ϵ_{45° und in Abb. 9.11 der Vergleich gemessener und berechneter Dehnungsverteilungen dargestellt (Berechnung: Dr. Samuel Forest, Ecole des Mines de Paris). Man erkennt sehr deutlich eine sehr inhomogene Dehnungsverteilung, Abb. 9.10. Die Simulation gibt das Verhalten im plastischen Bereich nicht immer exakt wieder.

Orientierung in der Mitte des Standarddreieckes/[001]-[011]-[111]

Die Abb. 9.12 und 9.13 geben die Dehnungsverteilung (ϵ_{45°) in Abhängigkeit des Umfangs- bzw. Torsionswinkels wieder. Auch hier ist deutlich die inhomogene Dehnungsverteilung zu sehen.

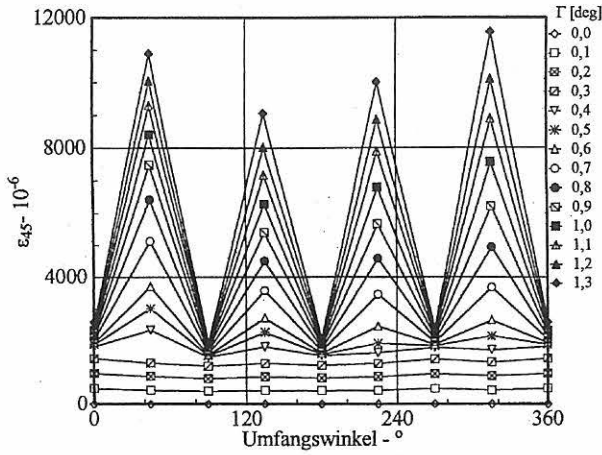


Abb. 9.8: Ermittelte Dehnungsverteilung ϵ_{45} in Abhängigkeit des Umfangs- und Verdrehwinkels für [001]-orientierte Probe, Torsionsversuch

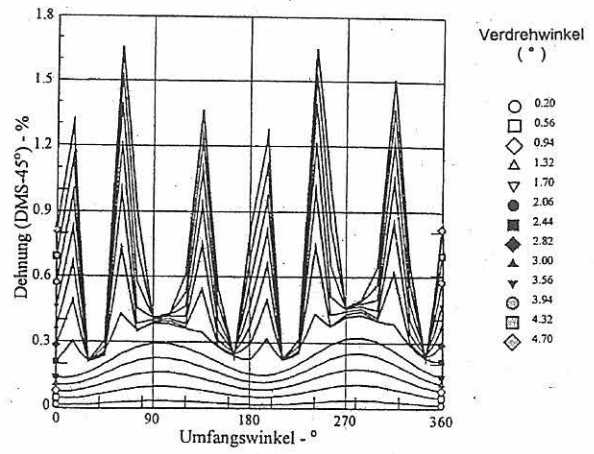


Abb. 9.11: FEM-Analyse: ϵ_{45} in Abhängigkeit des Umfangswinkels und des Verdrehwinkels, Torsionsversuch (Samuel Forest, Ecole des Mines)

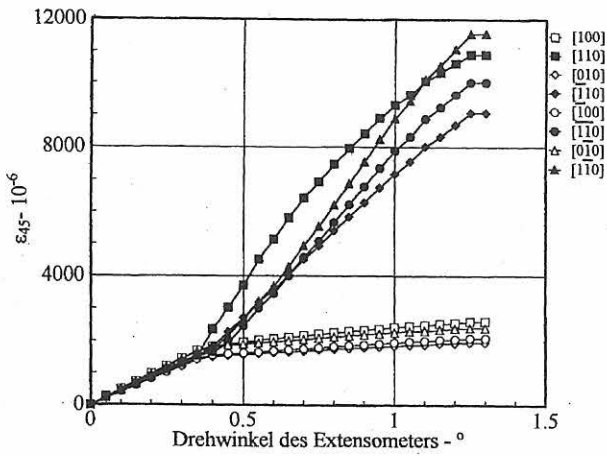


Abb. 9.9: Ermittelte Dehnung ϵ_{45} in Abhängigkeit des Verdrehwinkels, [001]-Orientierung, Torsionsversuch

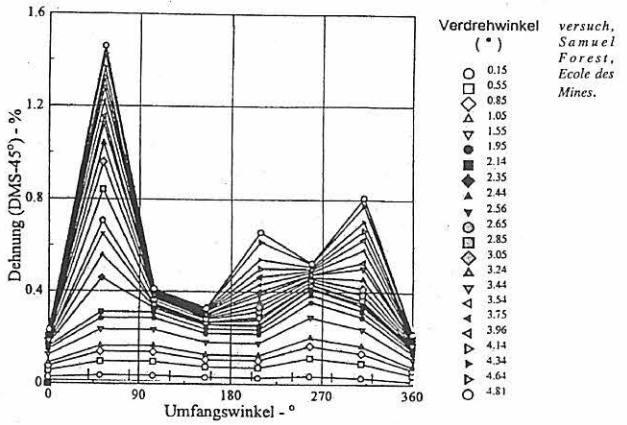


Abb. 9.12: Ermittelte Dehnungen ϵ_{45} für in der Mitte des Standarddreiecks orientierte Probe in Abhängigkeit des Umfangswinkels bzw. Torsionswinkels, Torsionsversuch

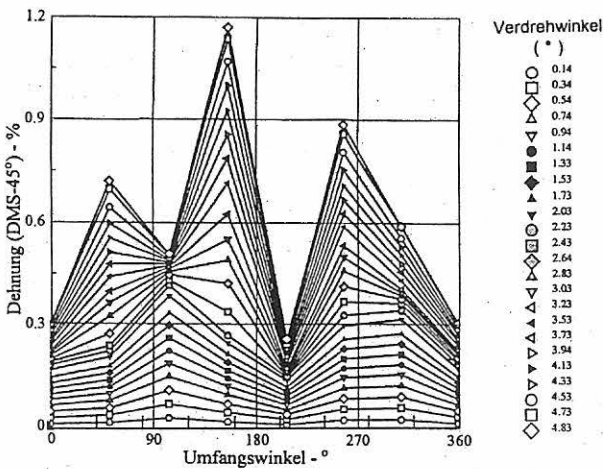


Abb. 9.10: Ermittelte Dehnungsverteilung ϵ_{45} für nahe [011]-orientierte Probe in Abhängigkeit des Umfangswinkels und des Verdrehwinkels, Torsionsversuch

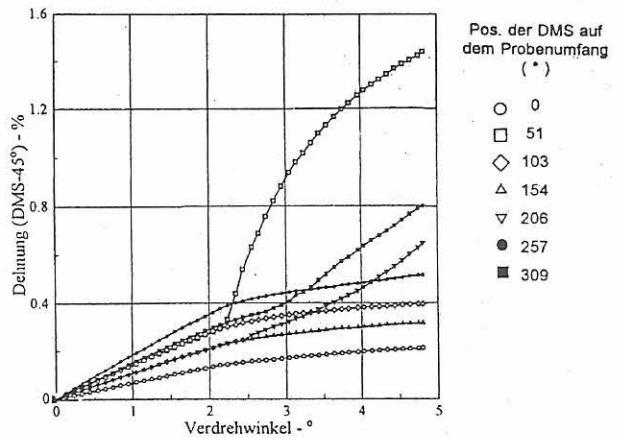


Abb. 9.13: Ermittelte Dehnungsverteilung ϵ_{45} in Abhängigkeit des Verdrehwinkels für in der Mitte des Standarddreiecks orientierte Probe, Torsionsversuch

C1 - 47

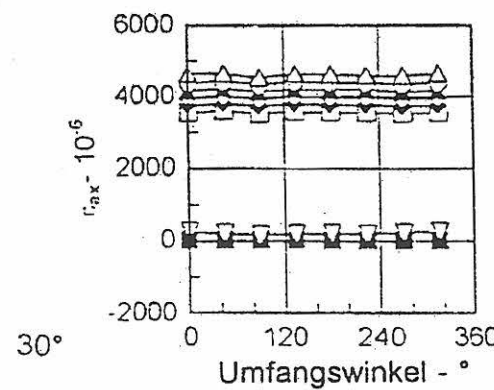
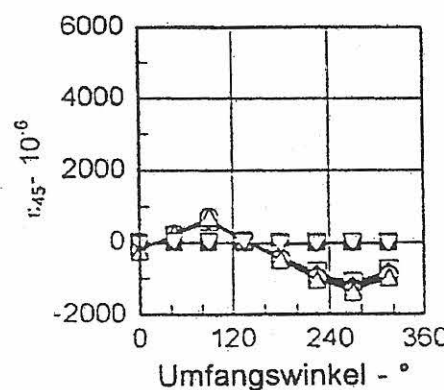
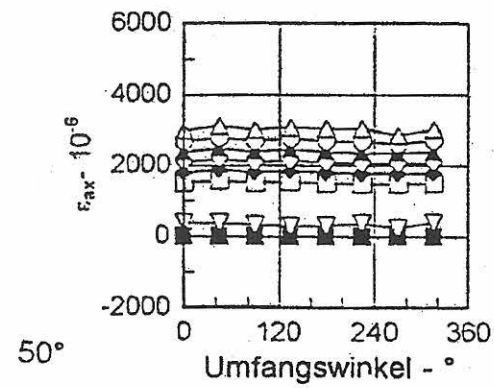
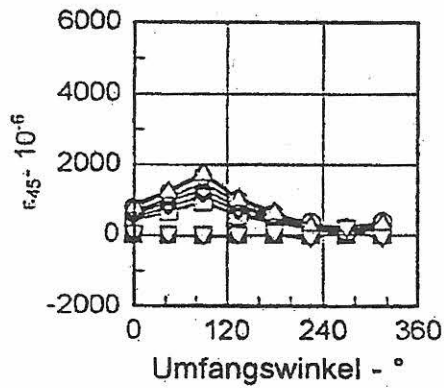
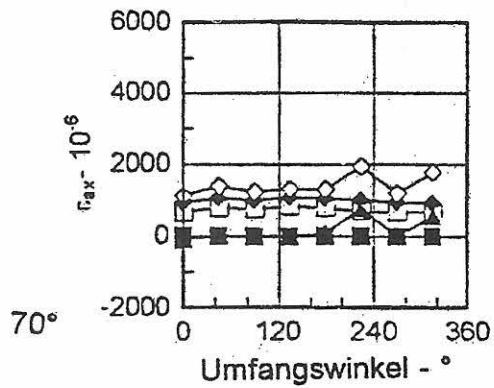
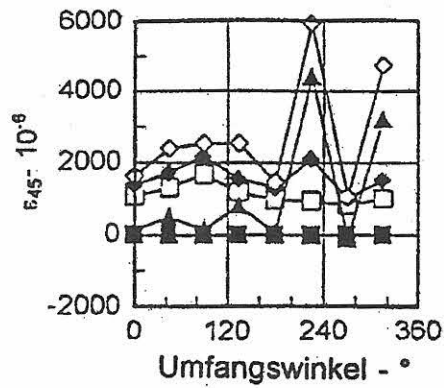
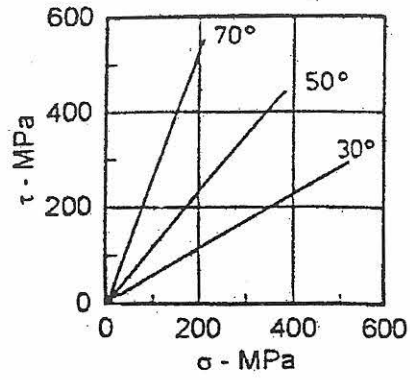


Abb. 9.14: Ermittelte Dehnungen ϵ_{ax} und ϵ_{45} während der Bestimmung der Fließfläche in Abhängigkeit des Umfangswinkels für die unterschiedlichen Belastungspfade

10 Bewertung der Ergebnisse

10.1 Kinetische Beziehungen

Die in Abhängigkeit von Temperatur und Dehngeschwindigkeit durchgeführten Zugversuche können nach ZENER und HOLLomon [24] mit folgender Funktion beschrieben werden:

$$\sigma = f(\epsilon, Z); Z = \dot{\epsilon} \exp(\Delta H/RT)$$

ΔH ist die entsprechende Aktivierungsenergie für plastisches Fließen und R die Gaskonstante.

Zwischen der Temperatur und der Dehngeschwindigkeit besteht eine Koppelung. Identische Verfestigungskurven können mit unterschiedlichen Kombinationen von Dehngeschwindigkeit und Temperatur erhalten werden. Das weist darauf hin, daß der vorherrschende geschwindigkeitskontrollierte Prozeß durch thermisch aktivierte Versetzungsmechanismen bestimmt ist. Implizit wird in der o.a. Gleichung auch vorausgesetzt, daß für Verformungspfade, die ein konstantes Z ergeben, dieselben inneren Strukturen entwickelt werden.

Eine alternative Methode zur Bestimmung der Beziehung zwischen kinetischen und Verfestigungseffekten kann von Sprungversuchen mit der Dehngeschwindigkeit oder Temperatur ausgehen. Diese Methode wird sehr oft verglichen mit einem Verfahren, wo die entsprechenden Differenzen in der Spannung aus kontinuierlichen Kurven mit einem weiten Dehnungs- bzw. Temperaturfeld ermittelt werden. Beide Verfahren führten bei IN 738 LC zu gleichen Ergebnissen. Man kann demnach davon ausgehen, daß die vorherrschenden Verfestigungsmechanismen gleich waren. Die generelle Frage, ob transiente Geschichtseinflüsse aufgrund von kontinuierlichen (monotonen) Versuchen abgeleitet werden können, kann anhand der Versuchsergebnisse nicht geklärt werden.

10.2 Verfestigung, einachsig

Aus den monotonen Zugversuchen wurde die Verfestigungsrate $d\sigma/d\epsilon_p$ ermittelt und in Abhängigkeit der Spannung aufgetragen. Die sich ergebenden Kurven sind in Abhängigkeit der Dehngeschwindigkeit und Temperatur entlang der Spannungsachse verschoben. Dies kann als Indiz für einen Zusammenhang $\sigma = f(x)g(Z)$ angesehen werden. x ist eine Variable, die die innere Struktur beschreibt. Die Darstellung von $d\sigma/d\epsilon_p$ über der Spannung beschreibt den gesamten Verfestigungsbeitrag, also die isotrope und die richtungsabhängige Komponente. Die Trennung dieser Komponenten ist aufgrund von monotonen Versuchen nicht möglich.

10.3 Zyklische Verfestigung

Zyklische Verformungen sind Ursache für zusätzliche Verfestigungseffekte. Diese Effekte können aus monotonen einachsigen Versuchen nicht abgeleitet werden. Eine zyklische Ver- oder Entfestigung wird nach wenigen Zyklen beobachtet. Nach rd. 20 Zyklen wird meist ein stabilisierter Zustand erreicht. Weitere Beobachtungen betreffen Relaxationseffekte. Relaxation setzt bei bestimmten Spannungshöhen ein. Sogar bei Entlastungsvorgängen ist die Relaxation zu berücksichtigen.

Nichtproportionale mehrachsige zyklische Dehnungsamplituden bedingen bei einigen Werkstoffen zusätzliche zyklische Verfestigungen wie von Tanaka, Murakami und Oaka (1985) [25] für rostfreien Stahl gezeigt wurde. Der Betrag der Verfestigung war dabei mit steigender Komplexität der mehrachsigen Zyklen höher. IN 738 LC zeigte jedoch keine zusätzliche Verfestigung.

10.4 TMF-Versuche

Das Spannungs-Dehnungsverhalten in TMF-Versuchen von IN 738 LC ist ähnlich dem Verhalten isothermer Versuche bei gleichen Versuchsparametern. Beim TMF-Abkühlverhalten konnten die Werte des zugehörigen isothermen Zustandes nicht ganz erreicht werden. Das Verformungsverhalten von IN 738 LC scheint daher für den Abkühlvorgang nicht nur von der augenblicklichen Temperatur, sondern auch von der Temperaturgeschichte abhängig zu sein.

10.5 SC 16

Die Zielsetzung in der Frage der Einkristallverformung war, ob mit den Methoden der Kristallplastizität eine physikalisch fundierte Beschreibung anisotropen Materialverhaltens gelingt, als dies im Rahmen der Kontinuumsmechanik möglich ist. Verantwortlich für die Anisotropie des plastischen Fließens ist die Beschränkung der Verformungsmöglichkeiten des Einkristalls auf wenige kristallographische Gleitsysteme. Diese strukturbedingte Anisotropie ist Ursache dafür, daß eine Vorhersage des Verformungsverhaltens bzw. von Fließortkurven nur möglich ist, wenn die kristallographischen Verformungsmechanismen, insbesondere der Gleitvorgang, die gegenseitige Interaktion der Gleitsysteme und die Verfestigung (auch latente Verfestigung) berücksichtigt werden.

Gleiten auf bestimmten kristallographischen Ebenen ist niemals homogen. Die mikroskopisch hier im Vordergrund stehenden Inhomogenitäten sind die Gleitlinien. Erste Ergebnisse weisen darauf hin, daß das Verfor-

mungsverhalten auf der Grundlage der Gleitsysteme vorhergesagt werden kann. Dabei ist allerdings von inhomogenen und asymmetrischen Verformungsverteilungen auszugehen.

11 Zusammenfassung und Ausblick

Das thermomechanische Verhalten von IN 738 LC bei unterschiedlichen mit zunehmender Nichtproportionalität vorgegebenen axialen und torsionalen Dehnungskomponenten und thermischen Pfaden wurde detailliert untersucht. Dabei wurden für die Versuchstypen „Torsion“, „Zug-Druck + Torsion“, beide thermisch IP und 180 OP und mechanisch IP sowie den „komplexen“ Typus mechanisch IP mittels der v. Mises Hypothese verifiziert.

Lebensdaueranalysen wurden für fünf Versuchstypen unter Variation der Dehngeschwindigkeit im Temperaturbereich $450\text{ °C} < T < 950\text{ °C}$ durchgeführt. Die inelastische Arbeit W^{ine} des Zyklus bei $N_f/2$ modifiziert mit dem Multiaxial-Faktor MF nach Manson/Halford [23] wurde doppellogarithmisch über N_f aufgetragen. Damit lassen sich der exponentielle Zusammenhang mit $W^{\text{ine}} = \sum MF \sigma_{ij} \Delta \varepsilon_{ij}^{\text{ine}} = AN_f^m$ beschreiben und sich $N_f^{\text{sim}} = f(W^{\text{ine}})$ mit den zwei Kenngrößen A und m berechnen. Allerdings soll darauf hingewiesen werden, daß das Versagen auch von den Mitteltemperaturen T abhängen kann.

Das mechanische Verhalten der einkristallinen Legierung SC 16 kann zusammenfassend in drei Temperaturbereiche eingeteilt werden. Im Temperaturbereich $RT - 750\text{ °C}$ ist SC 16 ausgeprägt anisotrop, zeigt eine Zug-Druck-Asymmetrie sowie eine orientierungsabhängige kritische Schubspannung. Sie verformt und verfestigt sich inhomogen. Im hohen Temperaturbereich, 850 bis 1050 °C, verformt sich die Legierung SC16 nahezu isotrop und ist ausgeprägt dehngeschwin-

digkeitsabhängig. Auch im Übergangsbereich 750 °C bis 850 °C ist das mechanische Verhalten von der Dehngeschwindigkeit abhängig.

Die Inhomogenität bzw. Heterogenität des Verformungsverhaltens der γ - γ -Legierung SC 16 war bisher nicht Untersuchungsziel. Erste Ergebnisse weisen jedoch deutlich darauf hin, daß bei dieser Legierung von inhomogenen und asymmetrischen Verformungsverteilungen auszugehen ist. Zu einem sonst schon guten Gesamtverständnis von grundlegenden Zusammenhängen kontrastiert das mangelnde Verständnis der Anisotropie und Inhomogenität des mechanischen Verhaltens. Für den Einsatz und die Optimierung der Nickelbasis-Superlegierung SC 16 ist die Kenntnis der auftretenden Deformationsmechanismen und ihre gegenseitige Interaktion von zentralem Interesse.

Ziel weiterer Untersuchungen sollte es daher sein, mittels detaillierter 2D- bzw. 3D-Feldmeßtechnik bis in den Submikronbereich, verbesserter Gleitspurenanalyse und röntgenographischer Ermittlung der Orientierungsänderung im Verlauf der Verformung die im Einkristall SC 16 lokal und inhomogen ablaufenden Verformungsmechanismen aufzuklären. Ebenso ist die Kenntnis der internen phasenspezifischen Dehnungen und Spannungen im Zusammenhang mit den Verformungsmechanismen wichtig. Hochauflösende Röntgen- und Neutronendiffraktionstechniken erlauben hier integrale aber dennoch volumenaufgelöste Aussagen.

12 Literatur

- [1] *J. Ziebs, J. Meersmann, H.-J. Kühn:*
Effects of proportional and non-proportional straining sequences on the hardening/softening behaviour of IN 738 LC at elevated temperatures
Eur. J. Mech., A/Solids 13 (1994) No 5, pp.605-619
- [2] *D. Bettge, W. Österle, J. Ziebs:*
Temperature dependence of field strength and elongation of the Nickelbase superalloy IN 738 LC and the arresponding microstructural evolution.
Z. Metallk. 86 (1995) 3, S. 190-197
- [3] *J. Ziebs, J. Meersmann, H.-J. Kühn, N. Hülsmann, J. Olschewski:*
Multiaxial thermomechanical behaviour of IN 738 LC, Proc. Fourth International Conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue, St. Germain en Laye, May 1994, Vol. II, European Structural Integrity Society (ESIS) 1994, pp. 247-259
- [4] *J. Meersmann, J. Ziebs, H.-J. Kühn, R. Sievert, J. Olschewski, H. Frenz:*
The Stress-Strain Behaviour of IN 738 LC under Thermomechanical Uni- and Multiaxial Fatigue Loading.
In: Fatigue under Thermal and Mechanical Loading: Mechanism, Mechanics and Modelling, Proceed., Ed. J. Bressers and L. Rowny, Kluwer Academic Publishers (1996) pp. 425-434
- [5] *J. Ziebs, J. Meersmann, H.-J. Kühn, N. Hülsmann, J. Olschewski:*
Multiaxial Thermomechanical Behaviour of IN 738 LC Alloy. In: Multiaxial Fatigue and Design, ESIS Publ. 21, Ed. A. Pineau et al., Mechanical Engineering Publications Limited 1996, pp. 83-96
- [6] *J. Meersmann, H. Frenz, J. Ziebs, H.-J. Kühn, S. Forest:*
Thermo-Mechanical Behaviour of IN 738 LC and SC 16.
In: AGARD Conference Proc. 569 Thermal Mechanical Fatigue of Aircraft Engine Materials, North Atlantic Treaty Organization, 1996, 19-1 - 19-11
- [7] *S. Forest, J. Olschewski, J. Ziebs, H.-J. Kühn, J. Meersmann, H. Frenz:*
The Elastic/Plastic Deformation Behaviour of Varius Oriented SC 16 Single-Crystals under Combined Tension/Torsion Fatigue Loading.
In: Fatigue 96, Proc. Sixth Intern. Fatigue Congress, Vol. II, Ed. Lütjering and H. Nowack, Perganom 1996, pp. 1087-1092
- [8] *G. R. Leverant, M. Gell, S. W. Hopkins:*
in: Proceedings of the Second International Conference on the Strength of Metals and Alloys, Pacific Grove, California, 1970, pp. 1141-1144
- [9] *B. H. Kear, J. M. Oblak, A. F. Giamei:*
Stacking faults in gamma prime Ni₃ (Al, Ti) precipitation hardened Nickel-base alloys,
Met.Trans. 1 (1970) pp. 2477-2486
- [10] *D. C. Pratt:*
Improvements in engine performance,
Mat. Sci. Techn. 2 (1986) pp. 426-435
- [11] *S. Takeuchi, E. Kuramoto:*
Temperature and orientation dependence of the yield stress in Ni₃ Ga single crystals, *Act. Met.* 21 (1973) pp. 415-425
- [12] *C. Lall, S. Chin, D.P. Pope:*
The orientation and temperature dependence of the yield stress of Ni₃ (Al, Nb) single crystals
Met. Trans. 10 A (1979) pp. 1323-1332
- [13] *V. Paidar, D. P. Pope, V. Vitek:*
A Theory of the anomalous yield behaviour in L1 ordered alloys,
Acta Met. 32 (1984) pp. 435-448
- [14] *Y. Q. Sun, P. M. Hazzledine:*
Phil. Mag A, Cross-slip of superlattice dislocations from (111) on to (010) planes 58 (1988) pp. 603-618
- [15] *F. Jiao, D. Bettge, W. Österle, J., Ziebs:*
Tension-compression asymmetry of the (001) single crystal Nickel base superalloy SC 16 under cyclic loading at elevated temperatures
Acta mater. 44 (1996) pp. 3933-3942
- [16] *T. Kuttner:*
Mechanismen des Hochtemperaturkriechens einkristalliner Nickelbasis-Superlegierungen in [011] Orientierung.
Fortschrittsberichte VDI, Reihe 5, Nr. 328
- [17] *D. P. Pope, S. S., Ezz:*
International Metals Reviews, Mechanical properties of Ni₃ Al and Nickel-base alloys with high Volume fraction of γ' 29 (1984) pp. 136
- [18] *B. H. Kear:*
Pearcey, Trans. Tensile and creep properties of singly crystals of the Nickel-base superalloy TMS-AIME 239 (1967) pp. 1209
- [19] *G. R. Leverant, B. H. Kear, Oblak, I. M.:*
Creep of precipitation hardened Nickel-base alloy single crystals at high temperature,
Met. Trans. 1 (1973) pp. 355
- [20] *W. Österle:*
Arbeitsbericht für das Teilprojekt B 7, Quantitative Gefügeanalyse der Legierungen IN 738 LC und SC 16 nach einfacher und komplexer Hochtemperaturrebeanspruchung, 1993, 1995, Sfb 339

- [21] G. R. Leverant, B. H. Kear:
The Mechanism of creep in gamma prime precipitation – Hardened Nickel-base alloys at intermediate temperatures,
Met. Trans. 1 (1970) pp. 491
- [22] R. A. MacKay, R. D., Maier:
The Influence on the stress rupture properties of Nickel-base single crystals,
Met. Trans. A 13 A (1982) pp. 1747
- [23] V. Sass, W., Schneider, H., Mughrabi:
On the orientation dependence of the intermediate-temperature creep behaviour of monocrystalline Nickel-base superalloy,
Scripta metall. mater. 31 (1994) pp. 885
- [24] C. Zener, I. H. Hollomon:
Effect of strain rate upon plastic flow of steel.
J. Appl. Phys. 15 (1944) pp. 22-28
- [25] E. Tanaka, S. Murakami, M. Daka:
Effects of strain path shapes on nonproportional cyclic plasticity.
J. Mechn. Phys. Solids 33 (1985) pp. 559-575

13 Veröffentlichungen zum Projekt

- [1] D. Aurich, W. Österle, P. D. Portella, J. Ziebs:
Werkstoffprüfung einkristalliner Superlegierungen für Turbinenschaufeln.
Berichtsband Symposium „Materialforschung“ BMFT (Hg.): Bonn 1988, S. 1333-1353
- [2] D. Aurich, R. Helms, W. Österle, P. D. Portella, J. Ziebs:
Untersuchungen an einkristallinen Superlegierungen für Turbinenschaufeln.
VDEh (Hg.): Düsseldorf 1988, S. 140-150
- [3] Olschewski, R. Sievert, J. Meersmann, J. Ziebs:
Selection Calibration and Verification of Viscoplastic Constitutive Models used for Advanced Blading Methodology.
E. Bachelet u. a. (Hgs): High Temperature Materials for Power Engineering 1990, Proc. Conf. Liège, Belgium, Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 1990, Part II, pp. 1051-1060
- [4] Olschewski, R. Sievert, J. Meersmann, J. Ziebs:
Selction, Calibration and Verification of Viscoplastic Constitutive Models Used for Advanced Clading Methodology.
Proceedings of the Fouth Liège Conference on High Temperature Materials for Power Engineering 1990, Liège, 1990
- [5] Ziebs, J. Meersmann, H.-J. Kühn, S. Ledworuski:
Gesetzmäßigkeiten für die werkstoffmechanische Beschreibung des Verhaltens von Hochtemperaturwerkstoffen in Abhängigkeit von der Belastungsgeschichte und bei mehrachsiger Beanspruchung.
Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle und Arbeitsgemeinschaft für Hochtemperaturwerkstoffe, 13. Vortragsveranstaltung am 30.11.1990, Verein deutscher Eisenhüttenleute (VDEh) 1990, S.130-144
- [6] Ziebs, J. Meersmann, H.-J. Kühn, W. Wedell:
Gesetzmäßigkeiten für die werkstoffmechanische Beschreibung des Verhaltens von Hochtemperaturwerkstoffen in Abhängigkeit von der Belastungsgeschichte und bei mehrachsiger Beanspruchung.
Fortschrittsberichte VDI, Reihe 5, Grund- und Werkstoffe No. 203, S. 97-112, VDI Verlag 1990
- [7] J. Ziebs, J. Meersmann, H.-J. Kühn, S. Ledworuski:
Gesetzmäßigkeiten für die werkstoffmechanische Beschreibung des Verhaltens von hochtemperaturwerkstoffen. Abhängigkeit von der Belastungsgeschichte und mehrachsiger Beanspruchung.
Sonderforschungsbereich 339; Schaufeln und Scheiben in Gasturbinen – Werkstoff- und Bauteilverhalten; Forschungsbericht 1988-1989, S. 339-428, TU Berlin 1990
- [8] J. Ziebs, K. Naseband.:
LCF-Experimente on single and polycrystalline metals – SRR 99 and IN 738 LC – under uniaxial and multiaxial strain controlled loading conditions.
Poster paper, Harmonisation of Testing Practice for High Temperature Materials, 18.-19. Oct. 1990, Ispra, Italien
High Temperature Mechanical Testing Committee
- [9] J. Ziebs, J. Meersmann, H.-J. Kühn:
Effects of Proportional and Nonproportional straining sequences on Hardening/Softening Behaviour of IN 738 LC at Elevated Temperatures.
Tagungsband: MECAMAT '92, International Seminar on Multiaxial Plasticity 01.-04.09.1992 Cachan-France.
- [10] J. Ziebs, J. Meersmann, H.-J. Kühn, S. Ledworuski:
High Temperature Inelastic Deformation of IN 738 LC under Uniaxial and Multiaxial Loading. Tagungsband: LOW CYCLE FATIGUE AND ELASTO-PLASTIC BEHAVIOUR OF MATERIALS – 3, Berlin, 07.-11.09.92, ELSEVIER APPLIED SIENCE 1992

- [11] *J. Ziebs, K. Naseband, H.-J. Kühn:*
LCF-Experiment an Single- and Polycrystalline Metals – SRR 99 and IN 738 LC – under Uniaxial and Multiaxial Strain Controlled Loading Conditions. Tagungsband: LOW CYCLE FATIGUE AND ELASTO-PLASTIC BEHAVIOUR OF MATERIALS – 3, Berlin, 07.-11.9.92, ELSEVIER APPLIED SCIENCE 1992
- [12] *J. Ziebs, J. Meersmann, H.-J. Kühn, H. Frenz:*
Gesetzmäßigkeiten für die werkstoffmechanische Beschreibung des Verhaltens von Hochtemperaturwerkstoffen in Abhängigkeit von der Belastungsgeschichte und bei mehrachsiger und thermomechanischer Beanspruchung. Forschungsbericht 1990-1992, Sonderforschungsbereich 339, Schaufeln und Scheiben in Gasturbinen, TU Berlin 1993, S. 365-406
- [13] *J. Ziebs, W. Wedell:*
Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit auf das Ermüdungsverhalten des Schaufelwerkstoffes IN 738 LC bei 650 °C. Forschungsbericht 1990-1992, Sonderforschungsbereich 339, Schaufeln und Scheiben in Gasturbinen, TU Berlin 1993, S. 565-576
- [14] *G. Froberg, J. Olschewski, W. Österle, R. P. Wahi, H. Wever, J. Ziebs:*
Die Superlegierung IN 738 LC: Ihr Festigkeits- und Verformungsverhalten. Forschung Aktuell Berlin, Nr. 39-41, Jahrgang 10, März 1993, S. 28-35
- [15] *J. Meersmann, J. Ziebs, H.-J. Kühn:*
Thermo-Mechanical Behaviour of IN 738 LC. Preprints: The Practicalities of Thermo-Mechanical Fatigue Testing, 30. Sept. 1993, High Temperature Mechanical Testing Committee 1993
- [16] *H.-J. Kühn, J. Ziebs, J. Meersmann:*
Dehnungsgeregelte biaxiale LCF-Versuche mit Temperaturzyklen bis 1000 °C. Werkstoffprüfung 1993, Vorträge der Tagung, 2.- 3.12. 1993 in Bad Nauheim, DVM 1993
- [17] *H.-J. Kühn, J. Meersmann, J. Ziebs:*
Ein Prüfsystem für biaxiale thermozyklische LCF-Versuche. Materialprüfung 36 (1994) S. 217-220
- [18] *J. Ziebs, J. Meersmann, H.-J. Kühn, S. Ledworuski:*
Experimental Techniques for Testing Materials under Multi-Axial Loading. In: Proc. Fourth International Conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue, Volume I, St. Germain en Laye, Société Française de Metallurgie et de Matériaux (SF2M), European Structural Integrity Society (ESIS), 1994, pp. 61-77
- [19] *J. Ziebs, J. Meersmann, H.-J. Kühn, N. Hülsmann:*
Multiaxial Thermomechanical Behaviour of IN 738 LC. In: Proc. Fourth International Conference on Biaxial/Multiaxial, Volume II, St. Germain en Laye, Société Française de Metallurgie et de Matériaux (SF2M), European Structural Integrity Society (ESIS), 1994, pp. 247-259
- [20] *J. Ziebs, J. Meersmann, H.-J. Kühn:*
Effects of proportional and non-proportional straining sequences on hardening softening behaviour of IN 738 LC at elevated temperatures. Eur. J. Mech. A/Solids 13 (1994) 5, pp. 605-619
- [21] *J. Ziebs, J. Meersmann, H.-J., Kühn, S. Ledworuski:*
Testing Materials under Multi-axial Loading – Experimental Techniques for Testing at Elevated Temperature. Materialprüfung 37 (1995) 4, S. 108-112
- [22] *J. Ziebs, J. Meersmann, H.-J. Kühn, S. Ledworuski:*
Multiaxial Loading at Elevated Temperatures – Experimental Practice. Materialprüfung 37 (1995) 5, S. 182-185
- [23] *J. Meersmann, J. Ziebs, H.-J. Kühn, R. Sievert, J. Olschewski, H. Frenz:*
The stress strain behaviour of IN 738 LC under thermomechanical uni- and multiaxial fatigue loading. Proceedings of International Symposium on Fatigue under Thermal and Mechanical Loading, Petten, The Netherlands, 22.5.-24.5.95
- [22] *H. Frenz, J. Meersmann, J. Ziebs, H.-J. Kühn:*
High Temperature Behaviour of IN 738 LC under Thermo-Mechanical Loading Conditions. In: Book of Abstracts of 7th Int. Conf. on „Mechanical Behaviour of Materials (ICM7)“, Ed.: A. Bakker, May 28 - June 2, 1995, The Hague, The Netherlands
- [23] *H. Frenz, H. Klingelhöffer:*
Die mechanisch-technologischen Eigenschaften des einkristallinen Nickelbasis-Turbinenschaufelwerkstoffes SC 16. In: Kurzfassungen der Hauptversammlung 1995 der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde e.V., 06.-09.06.1995, Bochum, DGM
- [24] *H. Frenz, H. Klingelhöffer:*
Comparison of the mechanical behaviour of the single crystal superalloy SC 16 and the polycrystalline alloy IN 738 LC at high temperature. In: Proc. 4th Europ. Conf. on „Advanced Materials and Processes (Euromat 95)“, 25.-28.09.1995, Padua/Venice, Italy, Band 2, Symposium D, pp. 273-278
- [25] *D. Bettge, W. Österle, J. Ziebs:*
Temperature dependence of the yield strength and elongation of the Nickel-base superalloy IN 738 LC and the corresponding microstructural evolution. Z. Metall. 86 (1995) pp. 190-197
- [26] *D. Bettge, W. Österle, J. Ziebs:*
Temperature dependence of additional cyclic hardening of Nickelbase superalloy during out-of-phase multiaxial deformation. Scripta metall. mat. 32 (1995) pp. 1601-1606
- [27] *H. Frenz, J. Kinder, P. D. Portella, A. Bertram:*
Cyclic Creep Behaviour of the Single Crystal Superalloy SRR 99 at 980 °C. In: Proc. 4th Europ. Conf. on „Advanced Materials and Processes (Euromat 95)“, 25.-28.09.1995, Padua/Venice, Italy, Band 2, Symposium D, pp 273-278

- [28] *J. Meersmann, H. Frenz, J. Ziebs, H.-J., Kühn, S. Forest:*
Thermo-mechanical Behaviour of IN 738 LC und SC 16. 81st. AGARD-SMP-Meeting-Proceedings 1995, Banff, Canada, 02.-04.10.1995
- [29] *J. Ziebs, J. Meersmann, H.-J. Kühn, N. Hülsmann, J. Olschewski.*
Multiaxial Thermomechanical Behaviour of IN 738 LC Alloy. In: Multiaxial Fatigue and Desig. ESIS-Publ. 21, Edited by A. Pineau, G. Cailletaud, T.C. Lindley, Mechanical Engineering Publications Limited, London 1996, pp. 83-96
- [30] *J. Ziebs, J. Meersmann, H.-J. Kühn, S. Ledworuski:*
Experimental Techniques for Testing Materials under Multiaxial Loading. In: Multiaxial Fatigue and Design. ESIS-Publ. 21, Edited by A. Pineau, G. Cailletaud, T.C. Lindley, Mechanical Engineering Publications Limited, London 1996, pp. 173-193
- [31] *J. Meersmann, J. Ziebs, H.-J. Kühn, R. Sievert, J. Olschewski, H. Frenz:*
The stress-strain behaviour of IN 738 LC under thermomechanical uni- and multiaxial fatigue loading. In: Fatigue Under Thermal and Mechanical Loading, Mechanisms, Mechanics and Modelling, Edited by J. Bressers and R. Rémy, Kluwer Academic Publishers 1996, pp. 425-434
- [32] *F. Jiao, D. Bettge, W. Österle, J. Ziebs:*
Tension-compression asymmetry of the (001) single crystal Nickel base superalloy SC 16 under cyclic loading at elevated Temperatures. Actamater. 44 (1996), pp. 3933-3942
- [33] *J. Ziebs, J. Bressers, H. Frenz, D. R. Hayhurst, H. Klingelhöffer, S. Forest:*
Herausgeber: Local Strain and Temperature Measurements in Non-Uniform Fiels at Elevated Temperatures. Proceedings of the Symposium held at Berlin 14-15 March 1996, Woodhead Publishing Limited, 1996
- [3] *J. Ziebs:*
Gesetzmäßigkeiten für die werkstoffmechanische Beschreibung des Verhaltens von Hochtemperatur-Werkstoffen in Abhängigkeit von der Belastungsgeschichte und bei mehrachsiger Beanspruchung. Vorstellung des Sonderforschungsbereiches Sfb 339, TU Berlin, 30.9.1988
- [4] *J. Meersmann:*
Werkstoffmechanische Versuche an IN 738 LC. Sfb 339, Berichtsseminar, 30.06.1989
TU Berlin und Hochtemperaturkolloquium, BAM, 06.07.1989
- [5] *J. Ziebs:*
Zug-, Wechseldehn- und proportionale sowie nichtproportionale mehrachsige Versuche an IN 738 LC bei RT und höheren Temperaturen. DVM-Arbeitskreis „Mechanisches Verhalten bei hohen Temperaturen“, BAM, 09.11.1989 sowie gleicher Vortrag bei COST 502: „Strukturabhängiges Werkstoffmodell“, BAM, 08.11.1989
- [6] *J. Ziebs:*
Hochtemperaturversuche an IN 738 LC. Sfb 339 Berichtsseminar, TU Berlin, 10.02.1989
- [7] *J. Ziebs, J. Meersmann, H.-J. Kühn, W. Wedell:*
Gesetzmäßigkeiten für die werkstoffmechanische Beschreibung des Verhaltens von Hochtemperaturwerkstoffen in Abhängigkeit von der Belastungsgeschichte und bei mehrachsiger Beanspruchung. 2. Werkstoffkolloquium des Sonderforschungsbereichs 339 „Schaufeln und Scheiben in Gasturbinen – Werkstoff- und Bauteilverhalten“, 10.-11.5.1990, TU Berlin
- [8] *J. Ziebs:*
Versuchsergebnisse zum werkstoffmechanischen Verhalten der Gußlegierung IN 738 LC unter ein- und mehrachsiger Beanspruchung. Sitzung der Fachkuratoren der Abt. 1, 31.5.1990, BAM
- [9] *J. Ziebs:*
Das mechanische Verhalten von IN 738 LC bei hohen Temperaturen. Arbeitsgemeinschaft Warmfeste Stähle, Arbeitsgemeinschaft Hochtemperaturwerkstoffe, VDEh, 13. Vortragsveranstaltung, Düsseldorf, 30.11.1990

Vorträge

- [1] *D. Aurich, W. Österle, P. D. Portella, J. Ziebs:*
Werkstoffprüfung einkristalliner Superlegierungen für Turbinenschaufeln. Symposium Materialforschung des BMFT, Hamm, 12.-14.09.1988
- [2] *D. Aurich, R. Helms, W. Österle, P. D. Portella, J. Ziebs:*
Untersuchungen an einkristallinen Superlegierungen für Turbinenschaufeln. AG-Hochtemperaturwerkstoffe 11. Vortragsveranstaltung, VDEh, Düsseldorf, 25.11.1988
- [10] *J. Meersmann:*
Temperaturstufenversuche an IN 738 LC. Berichtskolloquium Sfb 339, 25.10.1991
- [11] *J. Ziebs, J. Olschewski, D. Aurich, A. Bertram, P. D. Portella, J. Ziebs.*
Werkstoffmechanik von Einkristallwerkstoffen für Turbinenschaufeln. BDLI-Werkstofftag '91, Hamburg, 13.-15.11.1991
- [12] *J. Ziebs, J. Meersmann, H.-J. Kühn:*
Effects of Proportional and Nonproportional Straining Sequences on Hardening/Softening Behaviour of IN 738 LC at Elevated Temperatures. International Seminar on Multiaxial Plasticity – MECAMAT 92, Cachan, Frankreich, 01.-4.09.1992

- [13] *J. Ziebs, J. Meersmann, H.-J. Kühn, S. Ledworuski:* High Temperature Inelastic Deformation of IN 738 LC under Uniaxial and Multiaxial Loading. International Conference on Low Cycle Fatigue and Elastic-Plastic Behaviour of Materials, Berlin, 07.-11.09.1992
- [14] *J. Ziebs, K. Naseband, H.-J. Kühn:* LCF-Experiments on Single- und Polycrystalline als - SRR 99 and IN 738 LC – under Uniaxial and Multiaxial Strain Controlled Loading Conditions. International Conference on Low Cycle Fatigue and Elasto-Plastic Behaviour of Materials, Berlin, 07.-11.09.1992
- [15] *U. Brückner, W. Schuler, J. Ziebs:* Eigenspannungen und LCF-Untersuchungen zur Randzonenbeeinflussung beim Schleifen der Legierung IN 738 LC. Kolloquium über HT-Werkstoffe, Karlsruhe, 12.03.1992
- [16] *Meersmann, J. Ziebs, H.-J. Kühn:* Zyklisches Ent- und Verfestigungsverhalten von IN 738 LC unter proportionaler und nicht-proportionaler Zug-Torsions-Beanspruchung sowie unter Abfolge beider Beanspruchungsarten. Kolloquium über Hochtemperatur-Werkstoffe, Universität Karlsruhe 12.-13.03.1992
- [17] *J. Meersmann, J. Ziebs, H.-J. Kühn:* Gesetzmäßigkeiten für die werkstoffmechanische Beschreibung des Verhaltens von Hochtemperatur-Werkstoffen in Abhängigkeit von der Belastungsgeschichte und bei mehrachsiger auch thermomechanischer Beanspruchung. Berichtseminar SFB 339, TU Berlin, Berlin, 20.11.1992
- [18] *J. Ziebs:* Mehrachsige und mehrachsig thermo-mechanische Untersuchungen an IN 738 LC. DGM Arbeitskreis „Werkstoffversagen durch plastische Verformung und Bruch, 16.04.93 in DVM
- [19] *J. Ziebs:* Thermo-Mechanical Behaviour of IN 738 LC. The Practicalities of Thermo-Mechanical Fatigue Testing, Derby, 30. Sept. 1993
- [20] *J. Ziebs, J. Meersmann, H.- J. Kühn, D. Bettge:* Einflüsse von proportionalen und nichtproportionalen Zug-Torsion-Dehnungspfaden auf das Ver- und Entfestigungsverhalten von IN 738 LC. DGM Hauptversammlung 1993, 1.-4. Juni 1993, Friedrichshafen
- [21] *J. Meersmann, J. Ziebs, H.-J. Kühn:* Thermo-mechanisches Verhalten von IN 738 LC. DGM Hauptversammlung 1993, 1.-4. Juni 1993, Friedrichshafen
- [22] *J. Ziebs:* Forschungsaktivitäten zu Hochtemperaturwerkstoffen in der BAM. Arbeitsgruppe „Rißbildung bei komplexer zyklischer und thermischer Belastung“ im DVM-Arbeitskreis Bruchvorgänge, 12.11.93, Paderborn
- [23] *H.-J. Kühn, J. Ziebs, J. Meersmann:* Dehnungsgeregelte biaxiale LCF-Versuche mit Temperaturzyklen bis 1000 °C. Werkstoffprüfung 1993, 02. und 03.12.1993, Bad Nauheim, DVM
- [24] *H. Frenz, J. Kinder, P. D. Portella:* Microstructural and Damage Evolution of Single Crystalline SRR 99 at 980 °C under Static and Cyclic Loading Conditions. Postervortrag, ECF 10, Berlin, 20.09.1994
- [25] *H. Frenz, J. Meersmann, H.-J. Kühn, J. Ziebs, J. Olschewski:* Ein- und mehrachsige thermomechanische Untersuchungen am Werkstoff IN 738 LC. Seminarvortrag an der TU Braunschweig 04.05.1994
- [26] *H. Frenz, K. Naseband, H.-J. Kühn, N. Hülsmann:* LCF-Testing in the BAM-Essential Aspects of Realization. Postervortrag, Eurolab Workshop, Stuttgart, 15.-16.09.1994
- [27] *N. Hülsmann, H. Frenz:* Optimierung der Versuchsbedingungen bei der Prüfung von Hochtemperaturwerkstoffen. DVM-Tagung Werkstoffprüfung 1994, Bad Nauheim, 01.- 02.12.1994
- [28] *J. Ziebs, J. Meersmann, H.-J. Kühn, S. Ledworuski:* Experimental Techniques for Testing Materials under Multi-Axial Loading. Fourth International Conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue, St. Germain en Laye (France), May 31-June 3, 1994, veröffentlicht in: Proceedings Fourth International Conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue
- [29] *J. Ziebs, J. Meersmann, H.-J. Kühn:* Multiaxial Thermomechanical Behaviour of IN 738 LC. Fourth International Conference on Biaxial, Multiaxial Fatigue, St. Germain en Laye (France) May 31-June 3, 1994, veröffentlicht in: Proceedings Fourth International Conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue
- [30] *J. Meersmann, J. Ziebs, H.-J. Kühn:* The Thermo-mechanical Behaviour of IN 738 LC, Materials for Advanced Power. Engineering 1994, Oct. 3-6, Liège, Belgium, veröffentlicht in: Materials for Advanced Power Engineering 1994, Kluwer Academic Publishers
- [31] *H. Klingelhöffer:* Zug-, Kriech- und LCF-Versuche sowie Mikrostruktur von SC 16. Hahn-Meitner-Institut, Bereich Strukturforchung, Berlin, 18.11.1994
- [32] *J. Meersmann, H.-D. Kühn, J. Ziebs* Ein- und mehrachsige TMF-Tests mit praxisnahen Dehnungs-Temperatur-Vorgaben. TU-Berlin, Berichtsseminar des SFB 339, Berlin, 09.12.1994

- [33] *J. Ziebs, J. Meersmann, H.-J. Kühn, H. Frenz:* High Temperature Inelastic Deformation of IN 738 LC under Uniaxial and Multiaxial Loading. Eight Cimtex (World Ceramic Congress), Forum on New Materials, Florence, June 28-July 4, 1994, veröffentlicht in Proceedings of the 8th CIMTEX-World Ceramics Congress and Forum on New Materials, Hrsg.: P. Vincenzini,
- [34] *K. Naseband, H.-J. Kühn, J. Ziebs:* Realization and Experience of LCF-Testing in BAM; Essential Aspects. Eight Cimtex (World Ceramic Congress), Forum on New Materials, Florence, June 28-July 4, 1994, veröffentlicht in Proceedings of the 8th CIMTEX-World Ceramics Congress and Forum on New Materials, Hrsg.: P. Vincenzini,
- [35] *J. Meersmann, J. Ziebs, H.- J. Kühn:* Thermo-mechanisches Verhalten von IN 738 LC. Berichts-Kolloquium des Sonderforschungsbereichs 339 „Schaufeln und Scheiben in Gasturbinen – Werkstoff- und Bauteilverhalten“, TU Berlin 09.12.94
- [36] *J. Meersmann, H.-J. Kühn, J. Ziebs:* Ein- und mehrachsige thermomechanische Versuche mit praxisnahen Dehnungs-Temperatur-Pfaden, Korrelation mit der v. Mises-Theorie. Kolloquium über Hochtemperaturwerkstoffe, Universität Karlsruhe, 23.-24.02.95.
- [37] *H. Frenz, K. Naseband, N. Hülsmann, S. Ledworuski:* Qualitätssichernde Maßnahmen bei der mechanisch-technologischen Prüfung von Hochtemperaturwerkstoffen für den Turbinenbau. Postervortrag auf dem VDI-Werkstofftag '95, 15.-16. März 1995 in Aachen.
- [38] *J. Ziebs:* Ein- und mehrachsige Hochtemperaturversuche. Eine Einführung für Studenten der TUB, BAM, 19.04.95
- [39] *H. Frenz, J. Meersmann, J. Ziebs, H.-J. Kühn:* High Temperature Behaviour of IN 738 LC under Thermo-Mechanical Loading Conditions. 7th international Conference on Mechanical Behaviour of Materials, ICM 7, The Hague, The Netherlands, 28.5.-02.6.95.
- [40] *H. Klingelhöffer, U. Chrzanowski:* Mechanical and microstructural investigations on the Nickelbase superalloy SC 16 under creep and low cycle fatigue loading at high temperature. Brite-Euram-Projekt-Meeting, Athen-Pendeli, Griechenland, 02.06.1995
- [41] *P. D. Portella, A. Bertram, H. Frenz, J. Kinder:* Zyklisches Kriechverhalten von SRR 99 bei 980 °C. DGM-Hauptversammlung 1995, Bochum, 06.-09.06.1995.
- [42] *H. Klingelhöffer, H. Frenz:* Die mechanisch-technologischen Eigenschaften des einkristallinen Nickelbasis-Turbinenschaufelwerkstoffes SC 16. Postervortrag, DGM-Hauptversammlung 1995, Bochum, 06.-09.06.95.
- [43] *H. Klingelhöffer, H. Frenz:* Comparison of the mechanical behaviour of the single crystal superalloy SC 16 and the polycrystalline alloy IN 738 LC at high temperature. 4th Europ. Conf. on „Advanced Materials and Processes (Euromat 95)“, 25.-28.09.1995, Padua/Venice, Italy, Band 2, Symposium D, pp. 273-278
- [44] *H. Frenz, J. Kinder, P. D. Portella, A. Bertram:* Cyclic Creep Behaviour of the Single Crystal Superalloy SRR 99 at 980 °C. Euromat 95, Venice/Padua, Italy, 25.-28.9.95
- [45] *J. Meersmann, H. Frenz, J. Ziebs, H.- J. Kühn, S. Forest:* Thermo-mechanical Behaviour of IN 738 LC and SC 16. 81st Meeting of the Structures and Materials Panel. (AGARD/NATO) – Thermal Mechanical Fatigue of Aircraft Engine Materials. Banff, Canada, 02.-04.10.95
- [46] *H. Klingelhöffer, U. Chrzanowski:* Microstructural observations of the Single Crystalline Nickel Base Superalloy SC 16 under creep and LCF loading. The Seminar on „Mechanical Behaviour of Superalloys“, organized by the partners of the Brite Euram project BE5216 (1993-1995). Technical University Berlin, 04.-10.05.1995
- [47] *H. Frenz, J. Kinder, H. Klingelhöffer, P. D. Portella:* Gefügeänderungen und Versagensmechanismen von einkristallinen Nickelbasis-Superlegierungen unter Hochtemperaturbeanspruchung. Tagung „Gefüge und Bruch“, 20.-22.03.1996, Leoben, Österreich.
- [48] *H. Frenz, J. Kinder, H. Klingelhöffer, P. D. Portella:* Microstructural evolution and fracture mechanisms of single crystal superalloys under cyclic loading at high temperatures. Tagung „Rastermikroskopie in der Materialprüfung“, 27.-29.03.1996, Halle, DVM
- [49] *H. Frenz, P. D. Portella:* Review of the mechanical behaviour of single crystals. Czeck Academy of Science, Brno, 24.04.1996
- [50] *S. Forest, J. Olschewski, J. Ziebs, H.-J. Kühn, J. Meersmann, H. Frenz:* The electric-plastic deformation behaviour of various oriented SC 16 single-crystals under combined tension/torsion fatigue loading. 6th International Fatigue Congress, Fatigue '96, Berlin, 6-10 May 1996
- [51] *P. D. Portella, A. Bertram, E. Fahlbusch, H. Frenz, J. Kinder:* Cyclic behaviour of the single crystal superalloy SRR 99 at 980 °C. 6th International Fatigue Congress, Fatigue '96, Berlin, 6-10 May 1996

- [52] *R. Sievert, J. Meersmann, H.-J. Kühn, M. Bendig, H. Frenz, J. Olschewski, J. Ziebs:*
Lifetime investigations for Low-Cycle-Fatigue of a nickel-base superalloy under proportional and non-proportional loading at elevated temperatures. 6th International Fatigue Congress, Fatigue '96, Berlin, 6- 10 May 1996
- [53] *H. Frenz, H. Klingelhöffer, W. Wedell, U. Chrzanowski, J. Ziebs:*
Low cycle fatigue behaviour of the single crystal superalloy SC 16.
6th International Fatigue Congress, Fatigue '96, Berlin, 6-10 May 1996
- [54] *B. Fedelich, H. Frenz, W. Österle, K. Stark:*
A stochastic model for LCF small cracks growth in a nickel-base superalloy.
6th International Fatigue Congress, Fatigue '96, Berlin, 6-10 May 1996
- [55] *K. Naseband, S. Ledworuski, H.-J. Kühn, H. Frenz:*
High-temperature Low-Cycle-Fatigue testing-techniques, calibration, interpretation.
6th International Fatigue Congress, Fatigue '96, Berlin, 6-10 May 1996
- [56] *H. Klingelhöffer, U. Chrzanowski, E. Krämer, H. Frenz, J. Ziebs:*
Das Kriechverhalten der einkristallinen Nickelbasis-Turbinenschaufellegierung SC 16 mit [011]-Orientierung – Posterbeitrag für die Werkstoffwoche '96, Veranstalter: BMFB, DKG, DGM, VDI-W., Stuttgart, 28.-31.05.1996.
- [57] *H. Frenz, H. Klingelhöffer, J. Ziebs, P.D. Portella:*
Einkristalline Werkstoffe für Gasturbinen.
Werkstoffwoche '96; Veranstalter: BMFB, DKG, DGM, VDI-W, Stuttgart, 28.-31.05.1996
- [58] *K. Naseband, S. Ledworuski, H.-J. Kühn, H. Frenz:*
High-temperature Low-Cycle-Fatigue testing-techniques, calibration, interpretation.
Posterbeitrag für 3rd EUROLAB Symposium, Berlin, 5.-7.06.1996
- [59] *B. Fedelich, H. Frenz, W. Österle, K. Stark.* Experimental and Numerical Evaluation of Fatigue Crack Initiation and Propagation for IN 738 LC at 850 °C.
11th Biennial European Conf. on Fracture (ECF 11), 3.-6.09.1996, Poitiers-futuroscope, France
- [60] *H. Frenz, J. Kinder, H. Klingelhöffer, P. D. Portella:*
Fracture of Single Crystal Superalloys Under Cyclic Loading at High Temperatures.
11th Biennial European Conf. on Fracture (ECF 11), 3.-09.1996, Poitiers-futuroscope, France
- [61] *H. Frenz:*
Neuere Entwicklungen auf dem Gebiet der einkristallinen Superlegierungen für den Turbinenbau.
Festkolloquium anlässlich des 60. Geburtstages von Herrn Dr. D. Aurich, Berlin, 19.09.1996
- [62] *H. Frenz, J. Kinder, H. Klingelhöffer, P. D. Portella:*
Behaviour of Single Crystal Superalloys Under Cyclic Loading at High Temperatures. 8th Int. Symposium On Superalloys, 22. - 26.09.1996, Seven Springs, USA
- [63] *J. Ziebs, J. Meersmann, H. Frenz, H.-J. Kühn, H. Klingelhöffer:*
Verformungs- und Bruchverhalten ausgewählter ein- und vielkristalliner Nickelbasislegierungen unter ein- und mehrachsiger Beanspruchung.
Abschlusskolloquium des Sonderforschungsbereichs 339, Hahn-Meitner-Institut, Berlin, 14.-15.11.1996

Bisher erschienene Forschungsberichte der BAM

Nr. 1/1968

Forschung und Entwicklung in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
Rechenschaftsbericht für den Bundesminister für Bildung und Wissenschaft

Nr. 2/1970 (vergriffen)

G. Andreas
Zum Problem des Feuchtigkeitsschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern

Nr. 3/1970

J. Ziebs
Über das mechanische Verhalten von Aluminium-Stahl-Freileitungsseilen als Beispiel für Verbundbauteile

Nr. 4/1970 (vergriffen)

A. Burmester
Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit — Grundlagen und Vergütungsverfahren

Nr. 5/1971

N. Steiner
Die Bedeutung der Netzstellenart und der Netzwerkkettendichte für die Beschreibung der elastischen Eigenschaften und des Abbaus von elastomeren Netzwerken

Nr. 6/1971

P. Schneider
Zur Problematik der Prüfung und Beurteilung des Luftschallschutzes von Bauelementen bei unterschiedlichen Einbaubedingungen

Nr. 7/1971

H.-J. Petrowitz
Chromatographie und chemische Konstitution — Untersuchungen über den Einfluß der Struktur organischer Verbindungen auf das Verhalten bei der Dünnschicht-Chromatographie

Nr. 8/1971

H. Veith
Zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Baustählen bei Wechselbeanspruchung

Nr. 9/1971

K.-H. Möller
Untersuchung über die sichere Wirkung poröser Massen in Acetylenflaschen

Nr. 10/1972

D. Aurich, E. Martin
Untersuchungen über die Korngrößenbestimmung mit Ultraschall zur Entwicklung einer für die Praxis geeigneten zerstörungsfreien Meßmethode

Nr. 11/1972

H.-J. Krause
Beitrag zur Kenntnis der Schnittriefenbildung und Schnittgütwerte beim Brennschneiden

Nr. 12/1972

H. Feuerberg
Über Veränderungen von Nylon-6-Fasern beim Texturieren

Nr. 13/1972

K.-H. Habig, K. Kirschke, W.-W. Maennig, H. Tischer
Festkörpergleitreibung und Verschleiß von Eisen, Kobalt, Kupfer, Silber, Magnesium und Aluminium in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch zwischen 760 und $2 \cdot 10^{-7}$ Torr

Nr. 14/1972

E. Fischer
Untersuchungen zur Amplitudenabhängigkeit der Ultraschalldämpfung in Metallen bei 20 kHz

Nr. 15/1972

H. Pohl
Studie und Probleme der chemischen Edelmetall-Analyse

Nr. 16/1972

E. Knublauch
Über Ausführung und Aussagefähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102 Blatt 2 im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadenfeuer

Nr. 17/1972

P. Reimers
Aktivierungsanalyse mit schnellen Neutronen, Photonen und geladenen Teilchen

Nr. 18/1973

W. Struck
Das Sprödbruchverhalten des Baustahles R St 37-2 N in geschweißten Konstruktionen, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches

Nr. 19/1973

K. Kaffanke, H. Czichos
Die Bestimmung von Grenzflächentemperaturen bei tribologischen Vorgängen

Nr. 20/1973

R. Rudolphi
Brandrisiko elektrischer Leitungen und Installationen in Wänden

Nr. 21/1973

D. Klaffke, W. Maennig
Die kontinuumsmechanische Erfassung des zeitlichen Ablaufs der elastisch-plastischen Dehnungen bei der Zerrüttung

Nr. 22/1973

R. Rudolphi, E. Knublauch
Untersuchungen für ein Prüfverfahren zur Bemessung der Brandschutzbekleidung von Stahlstützen

Nr. 23/1973

W. Ruske
Reichs- und preußische Landesanstalten in Berlin. Ihre Entstehung und Entwicklung als außeruniversitäre Forschungsanstalten und Beratungsorgane der politischen Instanzen

Nr. 24/1973

J. Stanke, E. Klement, R. Rudolphi
Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung

Nr. 25/1973

E. Knublauch
Über das Brandgeschehen vor der Fassade eines brennenden Gebäudes unter besonderer Berücksichtigung der Feuerbeanspruchung von Außenstützen

Nr. 26/1974

P. Jost, P. Reimers, P. Weise
Der Elektronen-Linearbeschleuniger der BAM — Eigenschaften und erste Anwendungen

Nr. 27/1974

H. Wüstenberg
Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall

Nr. 28/1974

H. Heinrich
Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern

Nr. 29/1974

P. Schneider
Theorie der dissipativen Luftschalldämmung bei einem Idealisotropen porösen Material mit starrem Skelett für senkrechten, schrägen und allseitigen Schalleinfall

Nr. 30/1974 (vergriffen)

H. Czichos, G. Salomon
The Application of Systems Thinking and Systems Analysis to Tribology

Nr. 31/1975

G. Fuhrmann
Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens thermoplastischer Kunststoffe bei Wechseldehnungsbeanspruchung

Nr. 32/1975

R. Rudolphi, B. Böttcher
Ein thermo-elektrisches Netzwerkverfahren zur Berechnung stationärer Temperatur- und Wärmestromverteilungen mit Anwendungsbeispielen

Nr. 33/1975

A. Wagner, G. Kieper, R. Rudolphi
Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nichtstationären Meßverfahrens

Nr. 34/1976 (vergriffen)

H.-J. Deppe
Untersuchungen zur Vergütung von Holzwerkstoff

Nr. 35/1976

E. Limberger
Der Widerstand von Platten, die als Beplankungsmaterial leichter Wände verwendet werden, gegenüber dem Aufprall harter Körper — Vorschlag für ein Prüfverfahren

Nr. 36/1976 (vergriffen)

J. Hundt
Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles

Nr. 37/1976

W. Struck
Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen — Vorschlag für ein Prüfverfahren

Nr. 38/1976

K.-H. Habig
Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionitriertem Stahl 42 CrMo 4

Nr. 39/1976

K. Kirschke, G. Kempf
Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Flüssigkeiten (mit Nicht-Newtonschem Fließverhalten) insbesondere bei höherer Schwerbeanspruchung

Nr. 40/1976

H. Hantsche
Zum Untergrundabzug bei energiedispersiven Spektren nach verschiedenen Verfahren

Nr. 41/1976

B. Böttcher
Optische Eigenschaften cholesterinischer Flüssigkeiten

Nr. 42/1976

S. Dietlen
Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischung mit Luft

Nr. 43/1976

W. Struck
Das Sprödbruchverhalten geschweißter Bauteile aus Stahl mit zäh-sprödem Übergang im Bruchverhalten, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches

Nr. 44/1976

W. Matthees
Berechnung von räumlichen, linear elastischen Systemen, die aus finiten Stab- und Balkenelementen zusammengesetzt sind, unter Verwendung des Programms "Stab-Werk"

Nr. 45/1976

W. Paatsch
Untersuchung des Elektrodenverhaltens im Vakuum aufgedampfter Metallschichten

Nr. 46/1977 (vergriffen)

G. Schickert, H. Winkler
Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung (Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses)

- Nr. 47/1977
A. Plank
Bautechnische Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln für Fassadenbekleidungen
- Nr. 48/1977
U. Holzöhner
Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn
- Nr. 49/1977
G. Wittig
Untersuchungen zur Anwendung von Mikrowellen in der zerstörungsfreien Prüfung
- Nr. 50/1978 (vergriffen)
N. Czaika, N. Mayer, C. Amberg, G. Magiera, G. Andreae, W. Markowski
Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und Überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern
- Nr. 51/1978
J. Sickfeld
Auswirkung von chemischen und physikalisch-technologischen Einflußfaktoren auf das Beständigkeitsverhalten von Oberflächenbeschichtungen auf der Basis von Reaktionsbeschichtungsstoffen
- Nr. 52/1978
A. Tomov
Zum Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf das tribologische Verhalten von Werkstoffen hoher Härte bei reiner Festkörperreibung
- Nr. 53/1978
R.-G. Rohrmann, R. Rudolphi
Bemessung und Optimierung beheizbarer Straßen- und Brückenbeläge
- Nr. 54/1978
H. Sander
Magnetisches Verhalten dünner Eisenschichten bei mechanischer Wechselbeanspruchung
- Nr. 55/1978
D. Klaffke
Beobachtung und Orientierungsbestimmung der Oberflächenkristalle polykristalliner 99,999%-Al-Proben bei Biegewechselbeanspruchung
- Nr. 56/1979
W. Brünner, C. Langlie
Stabilität von Sandwichbauteilen
- Nr. 57/1979
M. Stadthaus
Untersuchungen an Prüfmitteln für die Magnetpulverprüfung (Investigations on Inspection-Media for Magnetic Particle-Testing)
- Nr. 58/1979
W. Struck
Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau
- Nr. 59/1979
G. Plauk
Ermittlung der Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mit der Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung des Verbundes zwischen Beton und Stahl
- Nr. 60/1979
H. Spreckelmeyer, R. Helms, J. Ziebs
Untersuchungen zur Erfassung der Kaltformbarkeit von Feinblechen beim Strecken
- Nr. 61/1979
K. Richter
Beschreibung von Problemen der höheren Farbmetrik mit Hilfe des Gegenfarbensystems
- Nr. 62/1979
W. Gerisch, G. Becker
Geomagnetobiologisch bedingter Zusammenhang zwischen der Fraßaktivität von Termiten und der Zahl der Sterbefälle
- Nr. 63/1979
E. Behrend, J. Ludwig
Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schiebern für Gase
- Nr. 64/1980
W. Rücker
Ermittlung der Schwingungserregung beim Betrieb schienengebundener Fahrzeuge in Tunneln sowie Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Ausbreitung von Erschütterungen im Tunnel und dessen Umgebung
- Nr. 65/1980
P. Schmidt, D. Aurich, R. Helms, H. Veith, J. Ziebs
Untersuchungen über den Einfluß des Spannungszustandes auf bruchmechanische Kennwerte
- Nr. 66/1980
M. Hattwig
Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung
- Nr. 67/1980
W. Matthees
Beitrag zur dynamischen Analyse von vorgespannten und vorbelasteten Feder-Masse-Systemen mit veränderlicher Gliederung unter stoßartiger Beanspruchung
- Nr. 68/1980
D. Petersohn
Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereomeßtechnik — Entwicklung eines volleuzentrischen Präzisions-Goniometers
- Nr. 69/1980
F. Buchhardt, P. Brandl
Untersuchungen zur Integrität des Liners von Reaktorsicherheitshüllen (Containments) in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise
- Nr. 70/1980 (vergriffen)
G. Schickert
Schwellenwerte beim Betondruckversuch
- Nr. 71/1980
W. Matthees, G. Magiera
Untersuchungen über durch den Boden gekoppelte dynamische Wechselwirkungen benachbarter Kernkraftwerksbauten großer Masse unter seismischen Einwirkungen
- Nr. 72/1980
R. Rudolphi
Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen
- Nr. 73/1980
P. Wegener
Vergleichende Untersuchungen zum Tragverhalten von Klemmkupplungen für Stahlrohrgerüste nach bestehenden deutschen Prüfvorschriften und geplanten europäischen bzw. internationalen Prüfnormen
- Nr. 74/1980
R. Rudolphi, R. Müller
ALGOL-Computerprogramm zur Berechnung zweidimensionaler instationärer Temperaturverteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz
- Nr. 75/1980
H.-J. Heinrich
Beitrag zur Kenntnis des zeitlichen und örtlichen Druckverlaufs bei der plötzlichen Entlastung unter Druck stehender Behälter und Behälterkombinationen
- Nr. 76/1980
D. Klaffke, W.-W. Maennig
Deformationsverhalten von Rein- und Reinstaluminium sowie Cu 99,9 und St 37 bei Biegewechselbeanspruchung im Rasterelektronenmikroskop
- Nr. 77/1981
M. Gierloff, M. Maultzsch
Untersuchung des Verhaltens von Lagerzementen
- Nr. 78/1981
W. Rücker
Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Schwellensystems mit dem Untergrund
- Nr. 79/1981
V. Neumann
Ein Beitrag zur Untersuchung der wasserstoffbeeinflußten Kaltrißeigung höherfester niedriglegierter Feinkornbaustähle mit dem Implantversuch
- Nr. 80/1981
A. Plank, W. Struck, M. Tzschätzsch
Ursachen des Teileinsturzes der Kongreßhalle in Berlin-Tiergarten
- Nr. 81/1981
J. Schmidt
Graphisch-rechnerisches Verfahren zum Erfassen der Zündhäufigkeit zündbarer Stoffe; Anwendung auf Datenmaterial aus dem Bereich der Statistik
- Nr. 82/1982
R. Helms, H.-J. Kühn, S. Ledworuski
Zur werkstoffmechanischen Beurteilung des Kerbschlagbiegeversuches (Assesement of the mechanical behaviour of materials in the notched bar impact test)
- Nr. 83/1982
H. Czichos, P. Feinle
Tribologisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen — Kontaktdeformation, Reibung und Verschleiß, Oberflächenuntersuchungen
- Nr. 84/1982
R. Müller, R. Rudolphi
Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen im Kleinprüfstand (Vergleichsversuche)
- Nr. 85/ISBN 3-88314-231-X/1982
H. Czichos
Technische Materialforschung und -prüfung — Entwicklungstendenzen und Rahmenvorschläge für ein EG-Programm "Basic Technological Research"
- Nr. 86/ISBN 3-88314-232-8/1982
K. Niesel, P. Schimmelwitz
Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügemerkmale
- Nr. 87/ISBN 3-88314-240-9/1982
B. Isecke, W. Stichel
Einfluß baupraktischer Umgebungsbedingungen auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen vor dem Injizieren
- Nr. 88/ISBN 3-88314-254-9/1983
A. Erhard
Untersuchungen zur Ausbreitung von Longitudinalwellen an Oberflächen bei der Materialprüfung mit Ultraschall
- Nr. 89/ISBN 3-88314-263-8/1983
D. Conrad, S. Diellen
Untersuchungen zur Zerfallsfähigkeit von Distickstoffoxid
- Nr. 90/ISBN 3-88314-264-6/1983
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen (Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members)
- Nr. 91/ISBN 3-88314-265-4/1983
M. Weber
Dreidimensionale Analyse von unbewehrtem Beton mit nichtlinear-elastischem Materialgesetz
- Nr. 92/ISBN 3-88314-266-2/1983
L. Auersch
Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden

- Nr. 93/ISBN 3-88314-283-2/1983
P. Studt
Unterdrückung stick-slip-induzierter Kurvengeräusche schienengebundener Fahrzeuge durch eine physikalisch-chemische Oberflächenbehandlung der Schienen
- Nr. 94/ISBN 3-88314-284-0/1983
Xian-Quan Dong
Untersuchungen der Störschwingungen beim Kerbschlagbiegeversuch und deren Abschwächungen
- Nr. 95/ISBN 3-88314-289-1/1983
M. Römer
Über die Fokussierung des Schallfeldes von Ultraschall-Prüfköpfen mit Fresnelschen Zonenplatten
- Nr. 96/ISBN 3-88314-296-4/1983
H. Eifler
Verbundverhalten zwischen Beton und geripptem Betonstahl sowie sein Einfluß auf inelastische Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken
- Nr. 97/ISBN 3-88314-297-2/1983
G. Fuhrmann, W. Schwarz
Typische Bruchflächenbildung thermoplastischer Kunststoffe nach wechselnder mechanischer Beanspruchung
- Nr. 98/ISBN 3-88314-312-X/1983
E. Schnabel
Bestimmung des elastischen Verhaltens von Maschinenwaren — Stretch- und Erholungsvermögen
- Nr. 99/ISBN 3-88314-317-0/1983
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen (Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members)
- Nr. 100/ISBN 3-88314-298-0/1984
G. Klamrowski, P. Neustupny
Untersuchungen zur Prüfung von Beton auf Frostwiderstand
- Nr. 101/ISBN 3-88314-327-8/1984
P. Reimers, J. Goebbels, H. Heidt, P. Weise, K. Wilding
Röntgen- und Gammastrahlen-Computer-Tomographie
- Nr. 102/ISBN 3-88314-335-9/1984
G. Magiera
Weiterentwicklung des hydraulischen Kompensationsverfahrens auf Druckspannungsmessung in Beton
- Nr. 103/ISBN 3-88314-328-6/1984
D. Schnitger
Radiographie mit Elektronen aus Metallverstärkerfolien
- Nr. 104/ISBN 3-88314-339-1/1984
M. Gierloff
Beeinflussung von Betoneigenschaften durch Zusatz von Kunststoffdispersionen
- Nr. 105/ISBN 3-88314-345-6/1984
B. Schulz-Forberg
Beitrag zum Bremsverhalten energieumwandelnder Aufsetzpuffer in Aufzugsanlagen
- Nr. 106/ISBN 3-88314-360-X/1984
J. Lehnert
Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last
- Nr. 107/ISBN 3-88314-361-8/1984
W. Stichel, J. Ehreke
Korrosion von Stahlradiatoren
- Nr. 108/ISBN 3-88314-363-4/1984
L. Auersch
Durch Bodenerschütterungen angeregte Gebäudeschwingungen — Ergebnisse von Modellrechnungen
- Nr. 109/ISBN 3-88314-381-2/1985
M. Omar
Zur Wirkung der Schrumpfbehinderung auf den Schweißspannungszustand und das Sprödbruchverhalten von unterpulvergeschweißten Blechen aus St E 460 N
- Nr. 110/ISBN 3-88314-382-0/1985
H. Walde, B. Kropp
Wasserstoff als Energieträger
- Nr. 111/ISBN 3-88314-383-9/1985
K. Ziegler
Über den Einfluß der Initiierung auf die detonative Umsetzung von Analex-Sprengstoffen unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Gesichtspunkte
- Nr. 112/ISBN 3-88314-409-6/1985
W. Lützwow
Zeitstandverhalten und strukturelle Veränderungen von vielfach wiederverarbeiteten Polyethylenen
- Nr. 113/ISBN 3-88314-410-X/1985
R. Helms, H. Henke, G. Oelrich, T. Saito
Untersuchungen zum Frequenzeinfluß auf die Schwingungskorrosion von Offshore-Konstruktionen
- Nr. 114/ISBN 3-88314-419-3/1985
P. Rose, P. Raabe, W. Daum, A. Szameit
Neue Verfahren für die Prüfung von Reaktorkomponenten mittels Röntgen- und Gammastrahlen
- Nr. 115/ISBN 3-88314-420-7/1985
K. Richter
Farbempfindungsmerkmal Elementarblau und Buntheitsabstände als Funktion von Farbart und Leuchtdichte von In- und Umfeld
- Nr. 116/ISBN 3-88314-460-6/1985
F.-J. Kasper, R. Müller, R. Rudolphi, A. Wagner
Theoretische Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Fensterkonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Rahmenproblematik
- Nr. 117/ISBN 3-88314-468-1/1985
H. Czichos, G. Sievers
Materials Technologies and Techno-Economic Development — A Study for the German Foundation for International Development (Deutsche Stiftung für Internationale Entwicklung)
- Nr. 118/ISBN 3-88314-469-X/1985
H. Treumann, H. Andre, E. Blossfeld, N. Pfeil, M.-M. Zindler
Brand- und Explosionsgefahren explosionsgefährlicher Stoffe bei Herstellung und Lagerung — Modellversuche mit pyrotechnischen Sätzen und Gegenständen
- Nr. 119/ISBN 3-88314-472-X/1985
J. Herter, K. Brandes, E. Limberger
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen — Versuche an Stahlbetonplatten, Teil I (Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members — Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part I)
- Nr. 120/ISBN 3-88314-514-9/1986
A. Hecht
Zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung an austenitischen Feinblechen mit Hilfe der Ultraschallrückstreuung
- Nr. 121/ISBN 3-88314-530-0/1986
P. Feinle, K.-H. Habig
Versagenskriterien von Stahlgleitpaarungen unter Mischreibungsbedingungen; Einflüsse von Stahlzusammensetzung und Wärmebehandlung
- Nr. 122/ISBN 3-88314-521-1/1986
J. Mischke
Entsorgung kerntechnischer Anlagen Sonderkolloquium der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) am 10. 12. 1985 mit Beiträgen von B. Schulz-Forberg, K. E. Wieser und B. Droste
- Nr. 123/ISBN 3-88314-531-9/1986
D. Rennoch
Physikalisch-chemische Analyse sowie toxische Beurteilung der beim thermischen Zerfall organisch-chemischer Baustoffe entstehenden Brandgase
- Nr. 124/ISBN 3-88314-538-6/1986
H.-M. Thomas
Zur Anwendung des Impuls-Wirbelstromverfahrens in der zerstörungsfreien Materialprüfung
- Nr. 125/ISBN 3-88314-540-8/1986 (vergriffen)
B. Droste, U. Probst
Untersuchungen zur Wirksamkeit der Brandschutzisolation von Flüssiggas-Lagertanks
- Nr. 126/ISBN 3-88314-547-5/1986
W. Stichel
Korrosion und Korrosionsschutz von Metallen in Schwimmhallen
- Nr. 127/ISBN 3-88314-564-5/1986 (vergriffen)
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter, K. Berner
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen — Versuche an Stahlbetonbalken, Teil I (Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members — Tests on Reinforced Concrete Beams, Part I)
- Nr. 128/ISBN 3-88314-568-8/1986 (vergriffen)
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter, K. Berner
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen — Versuche an Stahlbetonbalken, Teil II (Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members — Tests on Reinforced Concrete Beams, Part II)
- Nr. 129/ISBN 3-88314-569-6/1980 (vergriffen)
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter, K. Berner
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen — Zugversuche an Betonstahl mit erhöhter Dehngeschwindigkeit (Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load — Reinforcing Steel Tension Tests with high strain rates)
- Nr. 130/ISBN 3-88314-570-X/1986
W. Struck
Einfache Abschätzung der Durchbiegung und der Energieaufnahme von Trägern aus duktilem Material
- Nr. 131/ISBN 3-88314-585-8/1986
E. Limberger, K. Brandes, J. Herter
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen — Versuche an Stahlbetonplatten, Teil II (Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load — Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part II)
- Nr. 132/ISBN 3-88314-595-5/1987
Chr. Herold, F.-U. Vogdt
Ermittlung der Ursachen von Schäden an bituminösen Dachabdichtungen unter besonderer Berücksichtigung klimatischer Beanspruchungen
- Nr. 133/ISBN 3-88314-609-9/1987 (vergriffen)
M. Woydt, K.-H. Habig
Technisch-physikalische Grundlagen zum tribologischen Verhalten keramischer Werkstoffe
- Nr. 134/ISBN 3-88314-615-3/1987
G. Andreae, G. Niessen
Über den Kernstrahlungseinfluß auf Dehnungsmeßstreifen
- Nr. 135/ISBN 3-88314-618-8/1987
J. Ludwig, W.-D. Mischke, A. Ulrich
Untersuchungen über das Verhalten von Tankcontainern für unter Druck verflüssigte Gase bei Fallbeanspruchungen
- Nr. 136/ISBN 3-88314-636-6/1987
H.-J. Deppe, K. Schmidt
Untersuchung zur Beurteilung von Brettschichtverleimungen für den Holzbau

- Nr. 137/ISBN 3-88314-637-4/1987
D. Aurich
Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte auf der Grundlage von Forschungsergebnissen auf dem Gebiete der Komponentensicherheit
- Nr. 138/ISBN 3-88314-635-8/1987
M. Dogunke, F. Buchhardt
Zur geowissenschaftlichen Einordnung des Gebietes der Bundesrepublik Deutschland und einer sicheren Auslegung technischer Systeme gegen den Lastfall Erdbeben
- Nr. 139/ISBN 3-88314-658-7/1987
J. Olschewski, S.-P. Scholz
Numerische Untersuchung zum Verhalten des Hochtemperaturwerkstoffes Nimonic PE 16 unter monotoner und zyklischer Belastung bei Verwendung verschiedener plastischer und viskoplastischer Materialmodelle
- Nr. 140/ISBN 3-86314-643-9/1987
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen (Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members)
- Nr. 141/ISBN 3-88314-694-3/1987
F. Buchhardt, W. Matthees, G. Magiera, F. Mathiak
Zum Einfluß des Sicherheits- und Auslegungserdbebens auf die Bemessung von Kernkraftwerken
- Nr. 142/ISBN 3-88314-695-1/1987
H. Treumann, G. Krüger, N. Pfeil, S. von Zahn-Ullmann
Sicherheitstechnische Kenndaten und Gefahrdzahlen binärer Mischungen aus oxidierenden und verbrennlichen Substanzen
- Nr. 143/ISBN 3-88314-701-X/1987
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen — Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbauteilen bei Stoßbelastung (Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members — Experimental and numerical Investigations concerning Load Bearing Behaviour of Reinforced Concrete Members under Impact Load)
- Nr. 144/ISBN 3-88314-702-8/1987
F. Buchhardt, G. Magiera, W. Matthees, M. Weber, J. Altes
Nichtlineare dynamische Berechnungen zum Penetrationsverhalten des AVR-Reaktorgebäudes
- Nr. 145/ISBN 3-88314-711-7/1987
U. Holzlöhner
Untersuchung selbstähnlicher Systeme zur Bestimmung von Materialeigenschaften von Reibungsböden
- Nr. 146/ISBN 3-88314-714-1/1987
W. Schon, M. Mallon
Untersuchungen zur Wirksamkeit von Wasserberieselungseinrichtungen als Brandschutzmaßnahme für Flüssiggas-Lagertanks
- Nr. 147/ISBN 3-88314-720-6/1987
H.-D. Kleinschrodt
Lösung dynamischer Biege- und Torsionsprobleme von Stabsystemen aus dünnwandigen elastischen Stäben mit offenem Querschnitt mittels frequenzabhängiger Ansatzfunktionen
- Nr. 148/ISBN 3-88314-774-5/1988
W. Müller
Theoretische Untersuchung von Variationsprinzipien für elastoplastisches Materialverhalten sowie Entwicklung und numerische Erprobung von Finite-Element-Verfahren für den ebenen Spannungszustand
- Nr. 149/ISBN 3-88314-775-3/1988
U. Holzlöhner
Bestimmung baugrunderdynamischer Kenngrößen aus der Untersuchung von Bodenproben
- Nr. 150/ISBN 3-88314-776-1/1988
M. Weber
VG3D — Zeichenprogramm für vektographische Darstellung dreidimensionaler Strukturen
- Nr. 151/ISBN 3-88314-785-0/1988
L. Auersch-Saworski
Wechselwirkung starrer und flexibler Strukturen mit dem Baugrund, insbesondere bei Anregung durch Bodenerschütterungen
- Nr. 152/ISBN 3-88314-796-6/1988
G. Plauk, G. Kretschmann, R.-G. Rohrmann
Untersuchung des baulichen Zustandes und der Tragfähigkeit vorgespannter Riegel von Verkehrszeichenbrücken der Berliner Stadtautobahn
- Nr. 153/ISBN 3-88314-797-4/1988
H. Sander, W.-W. Maennig
Magnetisches Verhalten von Eisenproben bei mechanischer Wechselbeanspruchung
- Nr. 154/ISBN 3-88314-822-9/1988
K. Breitkreutz, P.-J. Uttech, K. Haedecke
Druckgesinterte Stähle als zertifiziertes Referenzmaterial für die Spektrometrie
- Nr. 155/ISBN 3-88314-825-3/1988
L. Auersch
Zur Entstehung und Ausbreitung von Schienenverkehrserschütterungen: Theoretische Untersuchungen und Messungen am Hochgeschwindigkeitszug Intercity Experimental
- Nr. 156/ISBN 3-88314-887-3/1989
G. Klamrowski, P. Neustupny, H.-J. Deppe, K. Schmidt, J. Hundt
Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Faserzementen
- Nr. 157/ISBN 3-88314-888-1/1989
E. Limberger, K. Brandes
Versuche zum Verhalten von Stahlbetonbalken mit Übergreifungsstößen der Zugbewehrung unter stoßartiger Belastung
- Nr. 158/ISBN 3-88314-889-X/1989
R. Wäsche, K.-H. Habig
Physikalisch-chemische Grundlagen der Feststoffschmierung — Literaturübersicht
- Nr. 159/ISBN 3-88314-890-3/1989
R. Müller, R. Rudolphi
Berechnung des Wärmedurchlaßwiderstandes und der Temperaturverteilung im Querschnitt von Hausschornsteinen nach DIN 18160 Teil 6
- Nr. 160/ISBN 3-88314-917-9/1989
W. Matthees
Entwicklung eines Makroelementes durch Kondensation am Beispiel der Lastfälle Flugzeugabsturz und Erdbeben bei Boden-Bauwerk-Wechselwirkung mit biegeweichen Fundamenten
- Nr. 161/ISBN 3-88314-920-9/1989
G. Mellmann, M. Maultzsch
Untersuchung zur Ermittlung der Biegefestigkeit von Flachglas für bauliche Anlagen
- Nr. 162/ISBN 3-88314-921-7/1989
W. Brünner
Untersuchungen zur Tragfähigkeit großer Glasscheiben
- Nr. 163/ISBN 3-88314-922-5/1989
W. Brünner, G. Mellmann, W. Struck
Biegefestigkeit und Tragfähigkeit von Scheiben aus Flachglas für bauliche Anlagen
- Nr. 164/ISBN 3-88314-934-9/1989
R. Helms, B. Jaenicke, H. Wolter, C.-P. Bork
Zur Schwingfestigkeit großer geschweißter Stahlträger
- Nr. 165/ISBN 3-88314-935-7/1989
P. Göbel, L. Meckel, W. Schiller
Untersuchung zur Erarbeitung von Kennwerten bei Einrichtungsmaterialien (Holzwerkstoffen, Möbeln und Textilien) hinsichtlich der Formaldehyd-Emission — Teil B: Textilien
- Nr. 166/ISBN 3-88314-936-5/1989
K. Breitkreutz
Modelle für Stereologische Analysen
- Nr. 167/ISBN 3-88314-937-3/1989
A. Mitakidis, W. Rücker
Erschütterungsausbreitung im elastischen Halbraum bei transienten Belastungsvorgängen
- Nr. 168/ISBN 3-88314-958-6/1990
F.-J. Kasper, R. Müller, R. Rudolphi
Numerische Untersuchung geometriebedingter Wärmebrücken (Winkel und Ecken) unter Einsatz hochauflösender Farbgraphik bei Berücksichtigung der Tauwasserproblematik und des Mindestluftwechsels
- Nr. 169/ISBN 3-88314-959-4/1990
Chr. Kohl, W. Rucker
Integration der Untergrundedynamik in das Programmsystem MEDYNA, dargestellt am Beispiel des Intercity Experimental (ICE)
- Nr. 170/ISBN 3-88314-960-8/1990
P. Studt, W. Kerner, Tin Win
Untersuchung der mikrobiologischen Schädigung wassergemischter Kühlschmierstoffe mit dem Ziel der Verbesserung der Arbeitshygiene, der Minderung der Geruchsbelastung und der Menge zu entsorgender Emulsionen
- Nr. 171/ISBN 3-88314-997-7/1990
F. Buchhardt
Ein Operator zur Koppelung beliebig benachbarter dynamischer Systeme am Beispiel der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung
- Nr. 172/ISBN 3-88314-998-5/1990
J. Vielhaber, G. Plauk
Grenztragfähigkeit großer Verbundprofilstützen
- Nr. 173/ISBN 3-88314-999-3/1990
B. Droste, J. Ludwig, B. Schulz-Forberg
Höherwertige Transporttechnik und ihre Konsequenzen für die Beförderung gefährlicher Güter
- Nr. 174/ISBN 3-88429-021-8/1990
D. Aurich
Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte
- Nr. 175/ISBN 3-88429-022-6/1990
W. Brocks, D. Klingbeil, J. Olschewski
Lösung der HRR-Feld-Gleichungen der elastisch-plastischen Bruchmechanik
- Nr. 176/ISBN 3-88429-035-6/1990
W. Matthees, G. Magiera
Iterative Dekonvolution der seismischen Basiserregung für den Zeitraum
- Nr. 177/ISBN 3-89429-090-0/1991
G. Schickert, M. Krause, H. Wigenhauser
Studie zur Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren bei Ingenieurbauwerken
- Nr. 178/ISBN 3-89429-429-9/1991
G. Andreae, J. Knapp, G. Niessen
Entwicklung und Untersuchung eines kapazitiven Hochtemperatur-Dehnungsaufnehmers für Einsatztemperaturen bis ca. 1000 °C
- Nr. 179/ISBN 3-89429-100-1/1991
H. Eifler
Die Drehfähigkeit plastischer Gelenke in Stahlbeton-Plattenbalken, bewehrt mit naturhartem Betonstahl BSt 500 S im Bereich negativer Biegemomente
- Nr. 180/ISBN 3-89429-101-X/1991
E. Klement, G. Wieser
Zur numerischen Übertragbarkeit von Prüfungsergebnissen an Hausschornsteinen auf Schornsteine mit anderen lichten Querschnitten
- Nr. 181/ISBN 3-89429-105-2/1991
H. Czichos, R. Helms, J. Lexow
Industrial and Materials Technologies Research and Development Trends and Needs

- Nr. 182/ISBN 3-89429-145-1/1992
M. Weber
Bestimmung von Wärmeübergangskoeffizienten im Bereich geometriebedingter Wärmebrücken
- Nr. 183/ISBN 3-89429-163-X/1992
F. Buchhardt
Zur Dekonvolution im Zeitbereich
- Nr. 184/ISBN 3-89429-164-8/1992
M. Maultzsch, W. Stichel, E.-M. Vater
Feldversuche zur Einwirkung von Auftaumitteln auf Verkehrsbauteile (im Rahmen des Großversuchs "Umweltfreundlicheres Streusalz")
- Nr. 185/ISBN 3-89429-165-6/1992
Renate Müller
Ein numerisches Verfahren zur simultanen Bestimmung thermischer Stoffeigenschaften oder Größen aus Versuchen — Anwendung auf das Heißdraht-Parallelverfahren und auf Versuche an Hausschornsteinen
- Nr. 186/ISBN 3-89429-211-3/1992
B. Löffelbein, M. Woydt, K.-H. Habig
Reibungs- und Verschleißuntersuchungen an Gleitpaarungen aus Ingenieurkeramischen Werkstoffen in wässrigen Lösungen
- Nr. 187/ISBN 3-89429-216-4/1992
Th. Schneider, E. Santner
Mikrotribologie: Stand der Forschung und Anwendungsmöglichkeiten — Literaturübersicht
- Nr. 188/ISBN 3-89429-243-1/1992
K. Mallwitz
Verfahren zur Vorausermittlung der Setzung von Fundamenten auf geständerten Strecken infolge zyklischer Beanspruchung
- Nr. 189/ISBN 3-89429-244-X/1992
W. Matthees, G. Magiera
Impedanzeigenschaften von Finiten-Elemente-Modellen bei Integration im Zeitraum
- Nr. 190/ISBN 3-89429-245-8/1992
G. Zachariev
Untersuchung des Versagens thermoplastischer Kunststoffe im Kurzzeit-Zugversuch und Retardations-Zugversuch
- Nr. 191/ISBN 3-89429-246-6/1992
H.-M. Bock, S. Erbay, J. With
Kritische Stahltemperatur als charakteristischer Kennwert für die Feuerwiderstandsdauer von Bauwerkssystemen aus Stahl
- Nr. 192/ISBN 3-89429-329-2/1993
D. Aurich
Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte — Lokales Rißwachstum, Ermittlung des Rißwiderstandsverhaltens aus der Kerbschlagarbeit
- Nr. 193/3-89429-291-1/1993
W. Gerisch, Th. Fritz, S. Steinborn
Statistical Consulting in the Frame of VAMAS. The Role of the Technical Working Arfa/Advisory Group. Statistical Techniques for Interlaboratory Studies and Related Projects (VAMAS Report No. 13)
- Nr. 194/ISBN 3-89429-330-6/1993
U. Krause
Ein Beitrag zur mathematischen Modellierung des Ablaufs von Explosionen
- Nr. 195/ISBN 3-89429-331-4/1993
U. Schmidtchen, G. Würsig
Lagerung und Seetransport großer Mengen flüssigen Wasserstoffs am Beispiel des "Euro-Québec Hydro-Hydrogen Pilot Projekts. Überblick über die in Deutschland anzuwendenden Gesetze, Verordnungen und technischen Regeln
- Nr. 196/ISBN 3-89429-362-4/1993
D. Lietze
Untersuchungen über das Anlaufen von Detonationen im Innern geschlossener Systeme
- Nr. 197/ISBN 3-89429-400-0/1993
A. Skopp
Tribologisches Verhalten von Siliziumnitridwerkstoffen bei Festkörpergleitreibung zwischen 22 °C und 1000 °C
- Nr. 198/ISBN 3-89429-421-3/1994
St. Meretz
Ein Beitrag zur Mikromechanik der Interphase in polymeren Faserverbundwerkstoffen
- Nr. 199/ISBN 3-89429-422-1/1994
W. F. Rücker, S. Said
Erschütterungsübertragung zwischen U-Bahntunneln und dicht benachbarten Gebäuden
- Nr. 200/ISBN 3-89429-423-X/1994
D. Arndt, K. Borchardt, P. Croy, E. Geyer, J. Henschen, C. Maierhofer, M. Niedack-Nad, M. Rudolph, D. Schaurich, F. Weise, H. Wiggenhauser
Anwendung und Kombination zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Bestimmung der Mauerwerksfeuchte im Deutschen Dom
- Nr. 201/ISBN 3-89429-475-2/1994
U. Holzlöhner, H. August, T. Meggyes, M. Brune
Deponieabdichtungssysteme — Statusbericht
- Nr. 202/ISBN 3-89429-481-7/1994
J. Schmidt
Über eine Verteilungsfunktion mit Parametern für Median, Spannweite, Schiefe und Wölbung — Konzept und Anwendung
- Nr. 203/ISBN 3-89429-483-3/1994
B. Schulz-Forberg, J. Ludwig
Sicherheitsniveaus von Transporttanks für Gefahrgut
- Nr. 204/ISBN 3-89429-484-1/1994
W. Struck, E. Limberger
Der Glaskugelsack als Prüfkörper für Beanspruchungen durch weichen Stoß — eine erweiterte Modellvorstellung
- Nr. 205/ISBN 3-89429-516-3/1995
P. Rose
Bestimmung charakteristischer Fehlermerkmale zur rechnergestützten Bildauswertung von Schweißnahtdiagrammen
- Nr. 206/ISBN 3-89429-517-1/1995
D. Lietze
Grenze der Flammendurchschlagsicherheit von Sperrschichten aus Bandsicherungen bei Deflagrationen und bei einem Nachbrand
- Nr. 207/ISBN 3-89429-593-7/1997
W. Daum
Zur objektiven Beurteilung der Bildqualität industrieller Radioskopiesysteme
- Nr. 208/ISBN 3-89429-557-0/1995
G. Kalinka
Ein Beitrag zur Kristallisation gefüllter und ungefüllter Thermoplaste
- Nr. 209/ISBN 3-89429-594-5/1995
D. Hoffmann, K. Niesel
Zur Quantifizierung des Effekts von Luftverunreinigungen auf Putzmörtel
- Nr. 210/ISBN 3-89429-595-3/1995
F. Buchhardt, W. Matthees, G. Magiera
Zur Erfassung der hysteretischen Dämpfung im Zeitraum
- Nr. 211/ISBN 3-89429-973-8/1997
G. Meier zu Köcker, K.-H. Habig
Steigerung der Lebensdauer und der Prozesssicherheit durch beschichtungsgerechte Fertigung von Werkzeugen und Bauteilen
- Nr. 212/ISBN 3-89429-974-6/1996
S. Dähne
Analytische Grundlagenuntersuchungen zur Laserimpulsfluorometrie im ultravioletten Spektralbereich
- Nr. 213/ISBN 3-89429-975-4/1995
J. Kelm
High Resolution NMR Spectroscopy for the Determination of Elastomers, Blends and Thermoplastic Elastomers — Carbon and Proton NMR Spectra Catalogue
- Nr. 214/ISBN 3-89429-976-2/1995
J. Moll
Exciton-Dynamics in J-Aggregates of an Organic Dye
- Nr. 215/ISBN 3-89429-950-9/1995
W. Müller u. a.
Modellhafte Untersuchungen zu Umweltschädigungen in Innenräumen anhand des Grünen Gebäudes
- Nr. 216/ISBN 3-89429-774-3/1997
C.-P. Bork, J. Hünecke, M. Golmann
Neue Stähle mit hoher statischer, dynamischer und Dauerfestigkeit für den Automobilbau
- Nr. 217/ISBN 3-89429-775-1/1997
W. Müller, M. Torge, D. Kruschke, K. Adam
Sicherung, Konservierung und Restaurierung historischer Glasmalereien
- Nr. 218/ISBN 3-89429-776-X/1997
S. Steinborn
Analyse von Verformung und Rißbildung bei Straßenbelägen durch Finite-Elemente-Methoden
- Nr. 219/ISBN 3-89429-777-8/1997
G. Fuhrmann, J. Bohse, H.-V. Rudolph
Schwingfestigkeit von Thermoplasten und Verbundwerkstoffen bei Umlaufbiegung
- Nr. 220/ISBN 3-89429-778-6/1997
D. Lietze
Grenze der Flammendurchschlagsicherheit von Sperrschichten aus Sintermetall
- Nr. 221/ISBN 3-89701-036-4/1997
R. Wäsche, F. Köse
Einfluß der Verfahrensparameter beim Gelcasting auf die Entstehung bruchauslösender Gefügefehler in hochreinen Aluminiumoxidkeramiken
- Nr. 222/ISBN 3-89701-037-2/1997
H. Frenz
Gesetzmäßigkeiten für die werkstoffmechanische Beschreibung der einkristallinen Nickelbasislegierung SC 16 unter ein- und mehrachsiger Beanspruchung

