

INHALTSVERZEICHNIS

1. EINLEITUNG	1
2. LITERATURÜBERSICHT	3
2.1. Thermomechanische Ermüdung von Superlegierungen	3
2.1.1. Ursachen der thermischen Ermüdung	3
2.1.2. Methoden zur Untersuchung nicht-isothermer Ermüdung	4
2.2. Modelle zur Lebensdauervorhersage unter nicht-isothermer Ermüdungsbelastung	18
2.2.1. Kriech-Ermüdungs Modelle	18
2.2.2. Oxidationsschädigungsmodelle	23
2.2.3. Oxidationsschädigungsmodell nach Neu und Sehitoglu	24
3. EXPERIMENTELLES	30
3.1. Werkstoffe	30
3.1.1. MA 6000	31
3.1.2. MA 760	33
3.2. Experimentelle Methodik	39
3.2.1. Apparativer Aufbau	39
3.2.1.1. Temperaturregelung	39
3.2.1.2. Dehnungsmessung / -regelung	43
3.2.1.3. Probengeometrie	44
3.2.2. Experimentelle Durchführung	47
3.2.2.1. TMF - Zyklusformen	48
3.2.2.2. Bithermische Zyklusformen	50
3.2.3. Zyklisches Kriechen	50
3.2.4. Oxidationsuntersuchungen	52
3.2.5. Metallographie	54
4. ERGEBNISSE	55
4.1. MA 760	55
4.1.1. Elastizitätsmodul	55
4.1.2. Isotherme Ermüdungsversuche	56
4.1.3. TMF Versuche - "UV Zyklus"	58
4.1.4. Schädigung unter TMF Belastung (UV Zyklus)	62
4.1.5. Bithermische Versuche	79

4.1.6. Schädigung unter bithermischer Belastung	83
4.1.7. Oxidation von MA 760	94
4.2. MA 6000	103
4.2.1. TMF - Versuche "in phase"	103
4.2.2. Bithermische Versuche "in phase"	104
4.2.3. Schädigung unter "in phase" Belastung	106
4.2.4. TMF - Versuche "out of phase"	110
4.2.5. Schädigung unter TMF "out of phase" Belastung	111
4.2.6. Bithermische Versuche "out of phase"	114
4.2.7. Schädigung unter bithermischer "out of phase" Belastung	115
4.2.8. Zyklische Ver-/ Entfestigung	119
4.2.9. TMF - Versuche "UV Zyklus"	120
4.2.10. Schädigung unter TMF - UV Belastung	122
4.2.11. Zyklische Lebensdauer	124
4.3. Zusammenfassung der Ergebnisse	127
4.3.1. Zyklische Lebensdauer	127
4.3.2. Schädigung	128
5. DISKUSSION DER ERMÜDUNGSERGEBNISSE	131
5.1. Mechanisches Verhalten bei nicht-isothermer Ermüdung	131
5.2. Werkstoffschädigung bei nicht-isothermer Ermüdung	136
5.2.1. Schädigung unter "in phase" Belastung	136
5.2.1.1. MA 6000 - interkristalline Schädigung	136
5.2.1.2. MA 760 - interkristalline Schädigung	139
5.2.1.3. MA 760 - kristallographische Schädigung	140
5.2.2. Schädigung unter "out of phase" Belastung	143
5.2.2.1. MA 6000 - interkristalline Schädigung	143
5.2.2.2. Ermüdungsschädigung	143
5.2.3. Schädigung unter TMF - UV Belastung	144
5.3. Diskussion der zyklischen Lebensdauern	145
5.3.1. MA 6000	145
5.3.1.1. Vergleich TMF - LCF	145
5.3.1.2. Vergleich TMF - BITMF	147
5.3.2. UV - Zyklus (MA 6000 und MA 760)	148
5.3.3. MA 760	150
5.3.3.1. Vergleich BITMF IP - OP	150
5.3.3.2. Vergleich BITMF 1 - BITMF 2 - TMF UV	151

6. MODELLIERUNG VON HYSTERESEKURVEN AUF DER BASIS VON ZYKLISCHEN KRIECHDATEN	152
6.1. Informationen aus zyklischen Kriechversuchen	152
6.2. Hysteresenmodellierung	159
6.2.1. Isothermen Hysteresen	160
6.2.2. Nicht-isothermen Hysteresen	161
6.3. Diskussion der Ergebnisse aus zyklischen Kriechversuchen	163
6.3.1. Verformungsmechanismen beim zyklischen Kriechen	163
6.3.1.1. Mechanismen während der Belastungsphase	164
6.3.1.2. Mechanismen während der Entlastungsphase	168
6.3.2. Zusammenfassung des zyklischen Kriechverhaltens	171
6.3.3. Grenzen der Modellierung mit zyklischen Kriechdaten	173
7. LEBENSDAUERVORHERSAGE FÜR MA 760 UNTER THERMOMECHANISCHER BELASTUNG	175
7.1. Modellanpassung für MA 760	175
7.2. Lebensdauervorhersage	184
8. ZUSAMMENFASSUNG	186
ANHANG	190
A1. Thermomechanische Ermüdung - Versuchstechnik	190
A2. Bithermische Ermüdung - Versuchstechnik	193
LITERATURVERZEICHNIS	195