

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Kenntnisstand	5
2.1 Bruchmechanik	5
2.1.1 Linear-elastisches Materialverhalten	6
2.1.2 Elastisch-plastisches Materialverhalten	7
2.1.3 Die Riss spitzenöffnung $CTOD$	10
2.2 Ermüdungsrisswachstum	12
2.3 Mechanismus des Riss schließens	16
2.4 Mechanismenbasiertes LCF- und TMF-Lebensdauermodell	20
2.4.1 Bruchmechanikparameter Z_D	22
2.4.2 Schädigungsparameter D_{TMF}	23
2.4.3 Integration der Lebensdauer	24
2.5 Mechanismenbasiertes LCF/HCF- und TMF/HCF-Lebensdauermodell	25
2.6 Bewertung von Anfangsdefekten	30
2.7 Zeit- und temperaturabhängige Verformungsmodellierung	33
3 Werkstofftechnische Grundlagen zu Aluminiumgusslegierungen	37
3.1 Vorstellung der Legierungssysteme	37
3.2 Temperaturabhängiges isothermes Lebensdauerverhalten	40
3.3 Einfluss thermomechanischer Ermüdungsbela stungen auf die Lebensdauer	44
3.4 Einfluss überlagerter HCF-Bela stungen auf die Lebensdauer	47
3.5 Mikrostruktur- und temperaturabhängige Schädigungsmechanismen	52
3.6 Einfluss der Anfangsdefektgröße auf die Lebensdauer	54
3.7 Vorhersage der maximalen Defektgröße mittels Extremwertstatistik	55

4 Versuchstechnik und Mikrostrukturcharakterisierung	57
4.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	57
4.1.1 Versuchsaufbau für Zugversuche	57
4.1.2 Versuchsaufbau für LCF- und TMF-Versuche	58
4.1.3 Versuchsaufbau für LCF/HCF- und TMF/HCF-Versuche	60
4.1.4 Replika-Technik	62
4.1.5 Experimentelle Messmethoden für Metallo- und Fraktographie	62
4.2 Mikrostrukturcharakterisierung	63
4.2.1 Bestimmung von intermetallischen Phasen	65
4.2.2 Bestimmung mikrostruktureller Kenngrößen	69
5 Experimentelle Untersuchung der Schädigungsentwicklung	73
5.1 Basischarakterisierung	74
5.1.1 Zugversuche	74
5.1.2 Isotherme CLCF-Versuche	74
5.1.3 TMF-Versuche	78
5.1.4 LCF- und TMF-Lebensdauerverhalten	81
5.2 Charakterisierung mit überlagerter HCF-Belastung	82
5.2.1 LCF/HCF-Versuche	83
5.2.2 TMF/HCF-Versuche	86
5.2.3 LCF/HCF- und TMF/HCF-Lebensdauerverhalten	88
5.3 Kurzrisswachstumsmessungen mit der Replika-Technik	89
5.3.1 Kurzrisswachstumsversuche am Werkstoff AlSi7Cu0,5Mg-T7	90
5.3.2 Kurzrisswachstumsversuche am Werkstoff AlSi12Cu3Ni2Mg-T7	94
5.4 Einfluss der lokalen Mikrostruktur auf die Lebensdauer	97
5.5 Temperatur- und belastungsabhängige Schädigungsmechanismen	100
5.5.1 Schädigungsmechanismen des Werkstoffs AlSi7Cu0,5Mg-T7	101
5.5.2 Schädigungsmechanismen des Werkstoffs AlSi12Cu3Ni2Mg-T7	105
5.5.3 Auswertung von Anfangsdefekten	110
6 Mechanismenbasierte Lebensdauermodellierung	113
6.1 Bestimmung von mechanischen und zeitabhängigen Werkstoffkennwerten	114
6.1.1 Quasistatische Werkstoffkennwerte aus den Zugversuchen	114
6.1.2 Zyklische Werkstoffkennwerte aus CLCF-Versuchen	115

6.1.3	Zeitabhängige Werkstoffkennwerte	116
6.2	Lebensdauerbewertung unter LCF- und TMF-Belastung	117
6.3	Erweiterung des Schädigungsparameters D_{TMF}	120
6.3.1	Berücksichtigung von Risschließeffekten	122
6.3.2	Modellanpassung und Lebensdauerbewertung	123
6.4	Erweiterung des LCF/HCF- und TMF/HCF-Lebensdauermodells	125
6.5	Anpassung des LCF/HCF-Lebensdauermodells an Replika-Versuche	129
6.5.1	Anpassung der Modellparameter	129
6.5.2	Vorhersage der Replika-Versuche	131
6.6	Lebensdauerbewertung unter LCF/HCF- und TMF/HCF-Belastung	133
7	Mikrostrukturbasierte FE-Modellierung von AlSi12Cu3Ni2Mg-T7	137
7.1	Mikrostrukturbasierte Zellmodelle	139
7.1.1	Digitalisierung der Mikrostruktur	139
7.1.2	Erstellung der Zellmodelle	140
7.2	Bestimmung und Validierung der Werkstoffeigenschaften	143
7.2.1	Linear-elastische Eigenschaften	143
7.2.2	Thermische Ausdehnungskoeffizienten	146
7.2.3	Viskoplastische Eigenschaften der Aluminiummatrix	148
7.3	Streuung des Elastizitätsmoduls in Abhängigkeit des Zellmodells	152
7.4	Lokale Belastungen in der Mikrostruktur	154
7.5	Mikrostrukturbasierte FE-Simulation von LCF-Belastungen	162
7.5.1	Belastungsabhängige Schädigungsentwicklung bei Raumtemperatur	162
7.5.2	Temperaturabhängige Schädigungsentwicklung	165
7.6	Mikrostrukturbasierte FE-Simulation von TMF-Belastungen	170
8	Diskussion der Ergebnisse	177
8.1	LCF- und TMF-Lebensdauerverhalten	177
8.1.1	Temperaturabhängigkeit der isothermen Wöhlerkurven	177
8.1.2	Einfluss der TMF-Belastung auf die Lebensdauer	180
8.1.3	Haltezeiteinfluss auf die TMF-Lebensdauer	182
8.2	Lebensdauerverhalten unter LCF/HCF- und TMF/HCF-Belastungen	183
8.2.1	HCF-Einfluss auf das Kurzrisswachstum	184
8.2.2	HCF-Schwellenwert	185

8.2.3	Haltezeiteinfluss auf die TMF/HCF-Lebensdauer	186
8.3	Einfluss von Mikrostruktur und Anfangsdefektgröße auf die Lebensdauer	187
8.3.1	Zusammenhang zwischen Anfangsdefektgröße und Lebensdauer	187
8.3.2	Relation von oberflächennahen Anfangsdefektgrößen und Kurzrisswachstumsmessungen	188
8.3.3	Mikrostruktureinfluss des Werkstoffs AISi12Cu3Ni2Mg-T7	190
8.3.4	Vorhersage der maximalen Defektgröße mittels Extremwertstatistik	191
8.4	Temperatur- und belastungsabhängige Schädigungsmechanismen	197
8.5	Mechanismenbasierte Lebensdauermodellierung	201
8.5.1	Schädigungsparameter $D_{\text{TMF, brittle}}$	201
8.5.2	Diskussion von Rissenschließeffekten	202
8.5.3	Diskussion der Anfangs- und Endrisslänge	202
8.5.4	HCF-Interaktion im Lebensdauermodell	208
8.5.5	Einfluss der Anzahl an überlagerten HCF-Zyklen	212
8.5.6	Deterministische Lebensdauervorhersage unter Berücksichtigung der Anfangsdefektgröße	214
8.6	Mikrostrukturbasierte FE-Simulation	216
8.6.1	Belastungs- und Temperaturabhängigkeit	217
8.6.2	Simulation von Partikelbruch und Partikeldekohäsion	217
8.6.3	Lokale Schädigungsbewertung	218
8.6.4	Kristallographische Orientierung von Aluminium und Silizium	220
8.6.5	Voxelbasierte Vernetzung des FE-Modells	220
9	Zusammenfassung und Ausblick	223
Literaturverzeichnis		229
Ehrenerklärung		259
Lebenslauf		261