



Lebensdauer und Schädigungsentwicklung martensitischer Stähle für Niederdruck-Dampfturbinenschaufeln bei Ermüdungsbeanspruchung im VHCF-Bereich

Stephan Kovacs

Forschungszentrum Jülich GmbH
Institut für Energie- und Klimaforschung (IEK)
Werkstoffstruktur und -eigenschaften (IEK-2)

Lebensdauer und Schädigungsentwicklung martensitischer Stähle für Niederdruck- Dampfturbinenschaufeln bei Ermüdungsbean- spruchung im VHCF-Bereich

Stephan Kovacs

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 214

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-89336-959-1

Inhaltsverzeichnis

<i>Kurzfassung</i>	I
<i>Abstract</i>	II
Inhaltsverzeichnis	III
Einleitung und Zielsetzung	1
1 Grundlagen und Stand der Technik	4
1.1 Grundlagen der Materialermüdung	4
1.2 Ermüdungsverhalten im VHCF-Bereich	6
1.2.1 Ermüdungsverhalten von Typ I-Werkstoffen	7
1.2.2 Ermüdungsverhalten von Typ II-Werkstoffen	8
1.2.3 VHCF-Verhalten martensitischer Stähle	10
1.2.4 VHCF-Belastung von Dampfturbinenschaufeln	11
1.3 Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit nach dem $\arcsin\sqrt{P}$ -Verfahren	12
1.4 Rissinitiierung bei sehr hohen Lastzykluszahlen	13
1.5 Einflussfaktoren auf die Schwingfestigkeit	18
1.5.1 Mittelspannung	18
1.5.2 Andere Einflussfaktoren	20
1.6 Bruchmechanik	22
1.6.1 <i>K</i> -Konzept	23
1.6.2 Schwellenwertuntersuchung nach Döker	25
1.6.3 <i>√area</i> -Konzept	27
1.7 Nichtlineares Materialverhalten	31
2 Experimentelle Methoden	34
2.1 Werkstoffcharakterisierung	34
2.2 Ermüdungsversuche	35
2.2.1 Materialprüfsysteme	35
2.2.2 Härtemessung	42
2.2.3 Temperaturmessung	43
2.3 Verfahren zur Untersuchung der Bruchflächen / Mikrostruktur	44
2.3.1 Lichtmikroskopie	44
2.3.2 Elektronenmikroskopie (REM/FIB)	44
2.3.3 Laserkonfokalmikroskopie	45
2.4 In-situ Signalanalyse	45
2.4.1 Experimenteller Aufbau	45

3	Ergebnisse und Diskussion	48
3.1	Ermüdungsversuche - LCF/HCF	48
3.2	Ermüdungsversuche - VHCF	49
3.2.1	Wöhlerdiagramm für $R = -1$	49
3.2.2	Wöhlerdiagramm für $R = 0,1$	53
3.2.3	Wöhlerdiagramm für $R = 0,5$	55
3.2.4	Wöhlerdiagramm für $R = 0,7$	57
3.2.5	Zusammenfassendes Wöhlerdiagramm	58
3.2.6	Haigh-Diagramm	61
3.2.7	Zyklische Kriechkurven	64
3.3	Fraktographie	66
3.3.1	Bruchflächen bei $R = -1$	66
3.3.2	Bruchflächen bei $R = 0,1$	73
3.3.3	Bruchflächen bei $R = 0,5$	76
3.3.4	Bruchflächen bei $R = 0,7$	79
3.3.5	Mikrostrukturelle und statistische Auswertung der Bruchmerkmale	80
3.3.6	Mikrostrukturelle Untersuchung der ODA	87
3.4	Bruchmechanische Analyse	93
3.4.1	\sqrt{area} -Konzept nach Murakami	93
3.4.2	Schwellenwertuntersuchung nach Döker	100
3.5	Härtemessung	104
3.5.1	Mikrohärte im Ausgangszustand	104
3.5.2	Mikrohärteverteilung einer VHCF-Probe bei $R = 0,1$	105
3.5.3	Mikrohärteverteilung einer VHCF-Probe bei $R = 0,5$	109
3.5.4	Mikrohärteverteilung einer VHCF-Probe bei $R = 0,7$	111
3.6	In-situ Rissdetektion	113
3.6.1	Untersuchung der Versuchsumgebung	114
3.6.2	Signalverläufe für $R = -1$	116
4	Zusammenfassung	123
	Literaturverzeichnis	126
	Abbildungsverzeichnis	135
	Tabellenverzeichnis	140



Energie & Umwelt/ Energy & Environment
Band/ Volume 214
ISBN 978-3-89336-959-1

 **JÜLICH**
FORSCHUNGSZENTRUM