Der Einfluss oberflächennaher Spannungsgradienten auf das Very High Cycle Fatigue Verhalten des Vergütungsstahls 42CrMo4



Der Einfluss oberflächennaher Spannungsgradienten auf das Very High Cycle Fatigue Verhalten des Vergütungsstahls 42CrMo4

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

der KIT-Fakultät für Maschinenbau des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Thomas Rohm

Tag der mündlichen Prüfung: 13.12.2018 Hauptreferent: Prof. Dr. rer. nat. Alexander Wanner Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Eberhard Kerscher

Berichte aus der Materialwissenschaft

Thomas Rohm

Der Einfluss oberflächennaher Spannungsgradienten auf das Very High Cycle Fatigue Verhalten des Vergütungsstahls 42CrMo4

> Shaker Verlag Düren 2019

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2019 Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6878-8 ISSN 1618-5722

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren Telefon: 02421/99011-0 • Telefax: 02421/99011-9 Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Meine wissenschaftliche Weiterbildung ist begleitet und ermöglicht worden durch eine Reihe von Personen, an die sich mein Dank richtet: Herrn Professor Dr. rer. nat. Alexander Wanner für die Betreuung meiner Arbeit, Herrn Professor Dr.-Ing. Eberhard Kerscher für die Übernahme des Korreferats und Forschungsbegleiter im Rahmen des durch die DFG - Deutsche Forschungsgemeinschaft geförderten SPP1466, sowie Herrn Dr.-Ing. Karl-Heinz Lang für die andauernde inhaltliche Auseinandersetzung mit den Fragen und Ideen rund um die Ermüdung und den Schadenstheorien. Der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der Hochschule Karlsruhe -Technik und Wirtschaft für die Bereitstellung der wissenschaftlichen Stelle und Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Michael Riemer, dem ehemaligen Dekan, der leider früh verstarb und den hohen Wert der Bildung und den wissenschaftlich methodischen Diskurs in besonderer Weise verinnerlicht hatte. Meinem Kollegen Marcus Korn und den Mitarbeitern am Institut für Angewandte Materialwissenschaften - Werkstoffkunde des Karlsruher Instituts für Technologie und ebenso meinen Kollegen an der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft für den gegenseitig unterstützenden und vertrauensvollen Umgang. Nicht zu vergessen ist der umfassende Beistand meiner Familie.

Zusammenfassung

Die zuverlässige Verwendung technischer Bauteile setzt die Kenntnis von deren Verhalten unter mechanischer Belastung voraus. Häufig werden Bauteile dabei wechselnd und wiederholt beansprucht, so dass der Werkstoffwiderstand gegen mechanische Ermüdung von besonderer Bedeutung ist. Sind beanspruchte Bauteile einer sehr hohen Anzahl von bis zu $N = 10^9$ Lastzyklen im so genannten Very High Cycle Fatigue (VHCF) Bereich ausgesetzt, können sich die auftretenden Ermüdungsmechanismen zum High Cycle Fatigue Bereich unterscheiden. Die vorliegende Arbeit widmet sich der Fragestellung, welchen Einfluss oberflächennahe Spannungsgradienten dabei auf das VHCF-Verhalten eines höchstfesten Vergütungsstahls besitzen. Als Versuchswerkstoff wird der Vergütungsstahl 42CrMo4 verwendet, der unter rein wechselnder, zyklischer Zug-Druck-Beanspruchung bis zu der Grenzlastspielzahl von $N = 10^9$ getestet wird. Die Variation der oberflächennahen Spannungsgradienten wird zum einen über umlaufende Rundkerben mit unterschiedlichen Kerbfaktoren, zum andern durch zwei mechanische Strahlverfahren erreicht. Ausgehend von glatten Proben und einem Kerbfaktor von $\alpha_k = 1,0$ wird die Spannungsüberhöhung an der Oberfläche durch Kerben mit $\alpha_k = 1,23$ und $\alpha_k = 1,41$ bis auf den Kerbfaktor $\alpha_{k} = 1,94$ erhöht. So kann der Einfluss unterschiedlich großer oberflächennaher Spannungsüberhöhungen und damit verbundenen Spannungsgradienten untersucht werden.

Des Weiteren werden durch mechanische Strahlverfahren, einem konventionellen Makrostrahlverfahren und einem Mikrostrahlverfahren, Druckeigenspannungen in den oberflächennahen Bereichen der Proben erzeugt. Im Gegensatz zum Makrostrahlverfahren weist das Mikrostrahlverfahren sehr hohe Druckeigenspannungsbeträge auf, die jedoch nur sehr geringe Eindringtiefen erreichen. So stehen, wie bei den Kerbgeometrien, unterschiedlich ausgeprägte Spannungsgradienten an der Probenoberfläche für die Untersuchungen zu Verfügung. Während Kerben den Ort des Ermüdungsversagens an der Oberfläche konzentrieren, bewirken Druckeigenspannungen eine Verlagerung des Rissinitiierungsortes unter die Oberfläche, weshalb auch die Kombination von Kerben und Strahlverfahren getestet wird.

Die Ergebnisse der Lebensdauerversuche für glatte Proben im Ausgangszustand zeigen, dass mit sinkender Spannungsamplitude und steigender Lastspielzahl der Versagensort von der Oberfläche in das Materialvolumen wechselt, wo der Riss an nichtmetallischen Einschlüssen initiiert wird. Unter der rein wechselnden Beanspruchung können im VHCF-Bereich die aus anderen Forschungsvorhaben bekannten Bruchflächenmerkmale wie Fine Granular Area (FGA) und Fisheve beobachtet werden. Ebenso können gängige bruchmechanische Konzepte, wie das $\sqrt{\text{area-Konzept}}$ von Murakami und Endo erfolgreich angewendet werden. Sind die Proben mit einer Umlaufkerbe versehen, kann kein Versagen im VHCF-Bereich festgestellt werden, auch wenn ein geringer Kerbfaktor von $\alpha_k = 1,23$ gewählt wird. Erst in Kombination mit einem Strahlverfahren, einem konventionellen Kugelstrahlverfahren oder einer Mikrostrahlanwendung, tritt bei den gekerbten Proben Volumenversagen und eine Verlängerung der Lebensdauer ein. Dies ist auch für glatte Versuchskörper, die an der Oberfläche mit einem Strahlverfahren behandelt werden, zu beobachten.

Die erzeugten oberflächennahen Druckeigenspannungen führen bei hinreichend niedriger Spannung bis in den VHCF-Bereich zu einer Vermeidung der Bruchinitierung an der Oberfläche und den unter Druckeigenspannung stehenden randnahen Werkstoffbereichen. Die wiederholte Belastung bis $N_{\rm G} = 10^9$ Zyklen erzeugt keinen signifikanten Abbau der Eigenspannungen, wie Tiefenmessungen belegen. Es können keine Hinweise für einen quantitativen Zusammenhang zwischen den Druckeigenspannungswerten sowie deren Verteilung und der Lebensdauer gefunden werden. Entscheidender für das Ermüdungsverhalten ist der Übergang von Druck- auf Zugeigenspannungen im Materialvolumen, da die das Versagen auslösenden nichtmetallischen Einschlüsse in aller Regel im Zugeigenspannungsbereich liegen. Dieser kann mit geringem Aufwand durch Härtemessmethoden bestimmt werden. Auf Grundlage dieses Tiefenwertes und lokaler Lastspannungswerte wird ein Auslegungskonzept vorgeschlagen. Danach wird empfohlen, oberflächennahe Spannungsüberhöhungen mit Hilfe von Makrooder Mikrostrahlverfahren erzeugten oberflächennahen Druckeigenspannungen zu kompensieren. Es muss darauf geachtet werden, dass der sich aus Bauteilgeometrie und Belastung ergebende Spannungsgradient im Bauteilvolumen in der Tiefe des Nulldurchgangs der Eigenspannungen den Dauerfestigkeitswert von glatten ungestrahlten Proben nicht übersteigt.

Die Berücksichtigung von im Volumen vorliegenden Zugeigenspannungen, die zu den oberflächennahen Druckeigenspannungen ein Gleichgewicht bilden, wird durch Verwendung bekannter bruchmechanischer Konzepte vorgenommen. Die darin festgelegte Wirkungsweise kann nur mit Einschränkungen auf die vorliegenden Versuchsergebnisse aus den Lebensdauertests im VHCF-Bereich angewendet werden. Auch die einschlägige Literatur spiegelt unterschiedliche Einschätzungen wider. Ausgelöst durch diese Uneindeutigkeit wird eine Formulierung einer Neubewertung des Einflusses von Zugeigenspannungen bei VHCF-Ermüdung vorgeschlagen. Es wird eine Arbeitshypothese formuliert, nach der Zugeigenspannungen die Lebensdauer im VHCF-Bereich erhöhen. Durch eine verminderte Energiefreisetzungsrate am nichtmetallischen Einschluss, unmittelbar in die umgebende metallische Matrix, werden mehr Belastungszyklen benötigt um eine FGA vollständig zu bilden und Langrisswachstum auszulösen. Davon abgeleitete dehnungskontrollierte Versuche belegen die Hypothese und liefern ein physikalisches Prozessmodell, das zur Bewertung bisher unklarer Ergebnisse herangezogen werden kann. Für die Weiterentwicklung und Spezifizierung dieses Prozessmodells sind noch weitere Forschungsarbeiten notwendig.

An die Idee der Bildung

Inhaltsverzeichnis

Vo	orwor	t	111
In	halts	verzeichnis	XI
Ał	bildı	ingsverzeichnis	XIII
Та	belle	nverzeichnis	XXI
AI	lgem	eine Formelzeichen und Benennungen	xxIII
1	Ziel	setzung und Struktur	1
2	Erm 2 1	üdungsverhalten von Stählen im VHCF-Bereich Bruchmechanik	3 4
	$\frac{2.1}{2.2}$	Der Einfluss oberflächennaher Snannungsgradienten	15
	2.2	2.2.1 Kerben als Auslöser für Spannungsgradienten	16
		2.2.2 Oberflächenbehandlung als Auslöser für Spannungs-	
		gradienten	22
	2.3	Einsatzgebiete für hochfeste Stähle	32
3	Wei	kstoffbeschaffenheit und Prüftechnik	35
	3.1	Versuchswerkstoff	35
	3.2	Probengeometrie	37
	3.3	Mechanische Oberflächenbehandlung	40
		3.3.1 Makrostrahlen	42
		3.3.2 Mikrostrahlen	43
	3.4	Anlage für hochzyklische Tests	44
	3.5	Analytische Methoden	48
		3.5.1 Eigenspannungsmessung	48
		3.5.2 Härtemessung	51
		3.5.3 Mikroskopie	52

		3.5.4	Computertomographie	53
4	Expe	eriment	elle Ergebnisse des Ermüdungsverhaltens	59
	4.1	Ungest	trahlte Proben	60
		4.1.1	Glatte Proben	60
		4.1.2	Gekerbte Proben	65
	4.2	Gestra	hlte Proben	67
		4.2.1	Eigenspannungszustand	67
		4.2.2	Glatte Proben	74
		4.2.3	Gekerbte Proben	83
	4.3	Härter	nessung	101
	4.4	Spann	ungs-Dehnungs-Hysteresekurven	106
5	Erör 5.1 5.2 5.3 5.4 5.5	terung Einflus Einflus Verwei Wirksa	des beobachteten Ermüdungsverhaltensss von Kerbenss von Strahlverfahrenss der Kombination aus Kerben und Strahlverfahrenndung von Härtemesswertenamkeit von Zugeigenspannungen	115 115 118 126 132 134
6	Folg	erung ı	und Ausblick	147
Α	Anh	ang		151
	A.1	Offsetl	korrektur	151
	A.2	Prober	nvorbereitung	153
Lit	eratu	ırverzei	chnis	155

Abbildungsverzeichnis

2.1	Beschreibung der äquivalenten projizierten Fläche, in Rich-	
	tung der Belastungsrichtung für einen Defekt nach [ME94]	7
2.2	Dauerfestigkeitsversuche an dem Wälzlagerstahl 100Cr6 bis	
	in den VHCF-Bereich [STS ⁺ 00]	9
2.3	Schematische Darstellung des Ermüdungsverhaltens eines	
	Werkstoffes mit vorhandenen Volumendefekten [Mug02]	9
2.4	a) Schematische Darstellung der Bruchflächenmerkmale mit	
	Rissinitierung an einem Einschluss nach [AMTT06] und b)	
	eine Bruchfläche mit $N_{\rm B} = 1, 17 \cdot 10^7$ bei $\sigma_{\rm a} = 612$ MPa	10
2.5	a) Mikrorissbildung durch Risseinleitung (Stadium I) sowie	
	sich weiter ausbildender Mikrorissfortschritt (Stadium II)	
	und b) Langrissfortschritt [RV07]	11
2.6	Rissfortschrittsrate kurzer Risse und Übergang zur Riss-	
	fortschrittsrate langer Risse als Funktion der Risslänge	
	bei unterschiedlicher Höhe der zyklischen Beanspruchung	
	$[RV07] \ldots \ldots$	11
2.7	a) Spannungsabfall an einem Kreisloch unter Zugbeanspru-	
	chung und b) Verlauf der Linien gleicher Spannung im	
	Abstand vom Kerbgrund eines Kreisloches unter Zugbean-	
	spruchung nach $[Sch01]$	17
2.8	Schematischer Zusammenhang zwischen der Dauerfestigkeit	
	für eine Kerbe mit steigender Kerbformzahl nach [NE88]	19
2.9	REM-Aufnahmen der Bruchflächen nach Rissinitiierung an	
	der Oberfläche im VHCF-Bereich a) von [AMTT06] und b)	
	$[QHZ10] \dots \dots$	21
2.10	Reduzierung der Ermüdungsfestigkeit durch Kerben nach	
	$[AMTT06] \dots \dots$	21
2.11	a) Tiefenverteilung der Eigenspannungen und b) lokaler	
	effektiver Spannungsintensitätsfaktor in Abhängigkeit des	
	Oberflächenabstandes [LSV02]	25

2.12	Ermüdungsversuche für unterschiedliche Oberflächenvaria-
	tionen [SL02]
2.13	Eigenspannungstiefenverteilungen in Ermüdungsversuchen für unterschiedliche Oberflächenvariationen [SL02]
2.14	Ermüdungsversuche für unterschiedlich hohe Eigenspan- nungswerte [SBKG ⁺ 08]
2.15	Oberflächennahe Eigenspannungsverteilung der Versuchsvarianten [SBKG ⁺ 08]
2.16	a) Transversaler Gefügeschliff und b) Ermüdungsbruchfläche [SBKG ⁺ 08]
2.17	Oberflächennaher Eigenspannungstiefenverlauf, hervorgeru- fen durch Kugelstrahlen an einem Federstahl [NZZZ13].
2.18	Ermüdungsversuche an einem Federstahl mit kugelgestrahl- ter Oberfläche[NZZZ13]
2.19	Durchschnittliche CO_2 Flottenemissionen der wichtigsten Automobilhersteller [Arc15]
2.20	Unterschied zwischen tatsächlichem und offiziellen CO_2 - Ausstoß von Kraftfahrtzeugen [Arc15]
3.1	Mit Nital geätztes Vergütungsgefüge
3.2	Abmessungen der Umlaufkerbe D, d_k, t_k und r_k . Abbildung nach [DIN12b]
3.3	Abmessungen und Kerbformzahlen der in den Versuchen verwendeten Proben
3.4	Darstellung der zwei Deformationsprozesse beim Strah- len von Stahl mit plastischer Streckung der Randschicht bzw. Hertz'schen Pressung und deren Auswirkungen auf die Eigenspannungs- und Dehnungsverteilung in Abhängigkeit vom Oberflächenabstand [MWS80]
3.5	Eigenspannungstiefenverläufe hervorgerufen durch eine Ku- gelstrahlbehandlung von normalisiertem (205 HV 0, 1), ver- gütetem (490 HV 0, 1) und gehärtetem (770 HV 0, 1) Ck45 [SM86]
3.6	Neu entwickelte Probenfassung für das 1000 Hz High-Cycle Fatigue Test System von MTS
3.7	1000 Hz High-Cycle Fatigue Test System von MTS in der Klimakammer

3.8	Eigenspannungsverteilung an einer kugelgestrahlten Probe aus 42CrMo4: a) Prinzipiell möglicher Verlauf der Druck- und Zugeigenspannungen und b) Vergleich der Eigenspan- nungsmessungen durch Röntgen- und Neutronenstrahlung [MPSV01]	50
3.9	CT-Aufnahme eines Einschlusses im Volumen einer Probe mit $D = 5$ mm, der nicht zum Versagen der Probe führte	55
3.10	Bruchfläche für eine kugelgestrahlte zylindrische Probe a) CT-Aufnahme der Bruchfläche, bei dem herausgetrenn- ten Probenteil und b) lichtmikroskopische Aufnahme der Bruchfläche mit ausgebrochenem Einschluss. $N_{\rm B} = 1, 6 \cdot 10^8$, $\sigma_{\rm a} = 678$ MPa	57
3.11	CT-Aufnahme eines Einschlusses an einem herausgetrennten Probenteil, der nicht das Versagen auslöst, a) Tomographieaufnahme in Belastungsrichtung und b) orthogonal zur Belastungsrichtung. $N_{\rm B} = 1, 6 \cdot 10^8, \sigma_{\rm a} = 678$ MPa	57
3.12	Lage der Einschlüsse in XZ-Ebene und deren Durchmesser in Voxel der im CT untersuchten Proben (Nr. 1 bis 4) mit Durchmesser $D = 3$ mm. Ausgewertet werden die Aufnahmen über die gesamte Messstrecke von $l = 10$ mm.	58
4.1	Lebensdauerverhalten glatter Proben	61
4.2	Äquivalente Risslänge $\sqrt{S_{xz}}$ und Einschlusstiefe d der Einschlüsse über die Bruchlastspielzahl für glatte Proben	62
4.3	Bruchflächenaufnahmen einer glatten Probe bei $N_{\rm B} = 6, 3 \cdot 10^7$ Zyklen und $\sigma_{\rm a} = 720$ MPa. Bild a) zeigt das Fisheye mit dem im Zentrum liegenden Einschluss, b) den Einschluss mit der ihn umgebenden FGA.	63
4.4	Bruchflächenaufnahmen eines Einschlusses einer glatten Probe bei $N_{\rm B} = 1, 8 \cdot 10^8$ Zyklen und $\sigma_{\rm a} = 731$ MPa. Bild a) unter dem Lichtmikroskop und Bild b) im Rasterelektro-	64
4.5	Spannungsintensität der Einschlüsse, sowie Einschlüsse mit FGA, für glatte Proben in Abhängigkeit von der Bruchlast-	04 64
4.6	Lebensdauerverhalten für gekerbte Proben, $\alpha_{\nu} = 1.23$.	66
	$\mathbf{r}_{\mathbf{K}}$	

4.7	Verteilung der Eigenspannungen einer Flachprobe nach [HWSV98] und einer gekerbten Proben mit Kerbfaktoren	
4.0	von $\alpha_{\mathbf{k}} = 1,23$ und $\alpha_{\mathbf{k}} = 1,41$, erzeugt durch Kugelstrahlen	70
4.8	Eigenspannungsmessungen an glatten und gekerbten Flach- proben ($\alpha_{\rm k} = 1,7$) aus gehärtetem Ck45, mit weichem	
	Strahlmittel (46–50 HRC) kugelgestrahlt, auf Dauerfestig- keitsniveau ($N_{c} > 10^7$ Zyklen), nach [HL02]	70
4.9	Eigenspannungstiefenverlauf für makrogestrahlte und ge-	10
	kerbte Proben ($\alpha_{\rm k} = 1, 23$), nach $N = 10^7$ und $N = 10^9$ Zy-	
	klen auf Dauerfestigkeitsniveau bei einer Nennspannung von	
	$\sigma_{\rm RWV} = 645 \text{ MPa} \dots \dots$	73
4.10	Eigenspannungstiefenverlauf für makrogestrahlte und ge-	
	kerbte Proben ($\alpha_{\rm k} = 1, 41$), nach $N = 10^{\circ}$ und $N = 10^{\circ}$ Zy-	
	kien auf Daueriestigkeitsniveau bei einer Nehnspannung von $\sigma = 645 \text{ MPs}$	79
1 11	$O_a = 040 \text{ MF}a$	75
4.11	den nichtmetallischen Einschlusses einer makrogestrahlten	
	glatten Probe bei $\sigma_{\rm a} = 715$ MPa und $N_{\rm B} = 4.2 \cdot 10^8$.	75
4.12	Lebensdauerverhalten makrogestrahlter glatter Proben .	75
4.13	Äquivalente Risslänge $\sqrt{S_{xx}}$ und Lage <i>d</i> der versagenskriti-	
	schen Einschlüsse für makrogestrahlte glatte Proben $$	76
4.14	Spannungsintensität $K_{\max, \mathrm{E}}$ an Einschlüssen für makroge-	
	strahlte glatte Proben ohne und mit Einberechnung der	
	Zugeigenspannungen	78
4.15	Spannungsintensität $K_{\text{max,FGA}}$ an den FGA für makroge-	
	strahlte glatte Proben mit und ohne Einberechnung der	70
4 16	Lugergenspannungen	10 80
4.10	Äquivalente Bisslänge \sqrt{S} und Lage <i>d</i> der versagenskriti-	80
1.11	schen Einschlüsse für mikrogestrahlte glatte Proben	80
4.18	Spannungsintensität K_{max} an Einschlüssen und FGA für	00
	mikrogestrahlte glatte Proben	82
4.19	Bruchflächen mit Einschlüssen von mikrogestrahlten glatten	
	Proben bei a) $N_{\rm B} = 3, 4 \cdot 10^6$ und $K_{\rm max,E} = 4, 4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$	
	ohne FGA und b) $N_{\rm B} = 8, 4 \cdot 10^7$ und $K_{\rm max,E} = 3, 3 {\rm MPa}\sqrt{{\rm m}}$	
1.00	mit FGA	82
4.20	Lebensdauerverhalten makrogestrahlter gekerbter Proben	0.4
	mit $\alpha_k = 1,23$	84

4.21	Äquivalente Risslänge $\sqrt{S_{xx}}$ und Lage d der versagenskriti-	
	schen Einschlüsse für makrogestrahlte gekerbte Proben mit	
	$\alpha_k = 1,23 \ldots \ldots$	85
4.22	Bruchfläche einer makrogestrahlten gekerbten Probe bei	
	$\sigma_2 = 760$ MPa und $N_{\rm B} = 5.1 \cdot 10^6$ mit mehreren Einschlüs-	
	sen. Angabe des Spannungsintensitätsfaktors in MPa ₁ /m.	
	mit Berücksichtigung des Spannungsgradienten und lokalen	
	Figenspannungen	86
4 23	Überlagerung von Last- und Eigenspannungen der makro-	00
1.20	gestrahlten gekerhten Probe mit $\alpha_1 = 1.23$ bei einer Nenn-	
	spanning von $\sigma = 645$ MPa und der elestischen Berech-	
	spanning von $v_a = 040$ km a und der elastischen Derech-	88
1 94	Aufnahma von der Spite mit Konnzeichnung der Kerberund	88
4.24	und Bruchflöchonohono oinor makrogostrahlton gekerhten	
	Proba mit $\alpha_{\rm r} = 1.23$ bai $N_{\rm p} = 2.0 \times 10^8$ Zyklon und	
	$\sigma = 668 \text{ MP}_2$	88
1 25	$\sigma_a = 000 \text{ MI} a$	88
4.20	oiner makrogestrahlten gekerbten Probe mit $\alpha_{\rm r} = 1.23$ bei	
	$N_{\rm p} = 2.0 \pm 10^8$ Zyklon und $\sigma = 668$ MPa	80
1 26	$N_{\rm B} = 2.0^{\circ} 10^{\circ}$ Zykien und $v_{\rm a} = 000$ Mi a $\ldots \ldots$	09
4.20	krogostrahlta gakarbta Proban $\alpha_{\rm r} = 1.23$ ahna und mit	
	Riogestrainte gekeibte i ioben, $\alpha_k = 1, 25$, onne und mit Borücksichtigung der Figonspannungen	00
1 97	Spannungsintensität an den ECA K_{max} für makrore	30
4.27	strahlta gekerbta Proben $\alpha_{\rm r} = 1.23$ abno und mit Bariick	
	signific generative from $\alpha_k = 1, 25$, online and that Deruck-	00
1 28	Labarsdauerversuche für mikrogestrahlte gekerbte Proben	30
4.20	$r_{\rm rescaled} = 1.23$	01
1 20	I ago und Größe der versagenskritischen Finschlüsse über	91
4.23	der Bruchlastenielgahl für mikrogestrahlte gekerbte Proben	
	mit $\alpha_1 = 1.23$	02
1 30	Spannungsintansität an dan Einschlüssen und ECA für mi	32
4.50	spannungsintensität an den Einschlussen und FGA für inf- krogostrahlte gekerbte Droben mit $\alpha_{\rm e} = 1.23$	03
1 21	Riogestrainte gekerbte i roben mit $\alpha_k = 1, 25$	95
4.91	1 23 und ovalom Fishovo $K_{\rm exp} = 3.6 \mathrm{MPa} / \mathrm{m}$ und $N_{\rm p} =$	
	1, 25 third ovalent Fisheye. $N_{\text{max},\text{E}} = 5,0$ km $a\sqrt{m}$ that $N_{\text{B}} = 3.2 \cdot 10^7$	04
1 39	Bruchfläche für eine mikrogestrahlte gekerhte Probe	34
4.04	1.23 und kreisförmigen Fisheve $K_{\rm p} = -3.8 \text{ MP}_{2} \sqrt{m}$	
	$1, 20$ und Krosoffingen Fisneye. $R_{\text{max},\text{E}} = 5, 0$ MI $d\sqrt{10}$	04
	$\operatorname{und} \operatorname{INB} = 0, 4.10 \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots \cdots $	$\mathcal{I}4$

4.33	Lebensdauerverhalten makrogestrahlter gekerbter Proben	
	mit $\alpha_{\mathbf{k}} = 1, 41 \dots \dots$	95
4.34	Äquivalente Risslänge $\sqrt{S_{xz}}$ und Lage d der versagenskriti-	
	schen Einschlüsse für makrogestrahlte gekerbte Proben mit	
	$\alpha_{\mathbf{k}} = 1,41 \ldots \ldots$	96
4.35	Spannungsintensität an den Einschlüssen, $K_{\max,E}$ für ma-	
	krogestrahlte gekerbte Proben $\alpha_k = 1, 41$, ohne und mit	
	Berücksichtigung der Eigenspannungen	97
4.36	Spannungsintensität an den FGA, $K_{\text{max,FGA}}$ für makroge-	
	strahlte gekerbte Proben $\alpha_k = 1, 41$, ohne und mit Berück-	
	sichtigung der Eigenspannungen	97
4.37	Bruchfläche mit höherer Vergrößerung für eine makroge-	
	strahlte gekerbte Probe $\alpha_{\rm k} = 1, 41. N_{\rm B} = 5, 6 \cdot 10^8, \sigma_{\rm a} =$	
	789 MPa	98
4.38	Bruchfläche für eine makrogestrahlte gekerbte Probe $\alpha_k =$	
	1,41. $N_{\rm B} = 5, 6 \cdot 10^8, \sigma_{\rm a} = 789 \text{ MPa}$	99
4.39	Lebensdauerverhalten makrogestrahlter gekerbter Proben	
	mit $\alpha_{\mathbf{k}} = 1,94\ldots$	101
4.40	Korrelation zwischen Härtemesswerten und Eigenspannun-	
	gen zur Beurteilung des Eigenspannungsverlaufes an einer	
	makrogestrahlten gekerbten Probe $\alpha_k = 1,23$ für unter-	
	schiedliche Prüfkräfte	103
4.41	Darstellung der Eindruckflächen bei unterschiedlichen Ein-	
	drücken der Messverfahren im Gefüge des verwendeten Ma-	
	terials	104
4.42	Härteverlauf für unterschiedliche Messmethoden im Ver-	
	gleich zu dem Eigenspannungstiefenverlauf für makroge-	
	strahlte gekerbte Proben mit $\alpha_k = 1, 41 \dots \dots$	105
4.43	Härteverlauf für unterschiedliche Messmethoden zur Ermitt-	
	lung des Eigenspannungstiefenverlaufs für makrogestrahlte	
	gekerbte Proben mit $\alpha_k = 1,94$	105
4.44	Aufbau der Dehnungsmessung an der zylindrischen Probe.	
	Ein auf der Probe aufgeklebter Dehnmessstreifen dient als	
	Überwachung. [RLK18]	107
4.45	Schematischer Ablauf der Testsequenz mit jeweils fünf Wie-	
	derholungen auf einem Mitteldehnungsniveau [RLK18] .	107
4.46	Verformungskurven nach unterschiedlicher Anzahl von Wie-	
	derholungen der Testsequenz	110

4.47	Auswertung der Hystereseflächen und deren spezifischem Arbeitsvermögen aus der dreizehnten Sequenz [RLK18].	111
4.40	Dehnung mit steigender Totalmitteldehnung [RLK18] .	111
4.49	Abhanne der Probensteingkeit in Abhangigkeit von der Mitteldehnung	113
5.1	Vergleich des Lebensdauerverhaltens von glatten und gekerbten Proben mit einem Kerbfaktor von $\alpha_{\rm k}=1,23$	116
5.2	Simulierter Spannungsverlauf der gekerbten Probe mit einem Kerbfaktor von $\alpha_k = 1,23$ für die Wechselfestigkeit von $\sigma_{RWO} = 589$ MPa im Vergleich zur Volumenwechselfestigkeit von glatten Proben mit $\sigma_{RWV} = 575$ MPa	117
5.3	Vergleich des Lebensdauerverhaltens ungestrahlter, mikro- gestrahlter und makrogestrahlter glatter Proben für Versa- gen an nichtmetallischen Einschlüssen	119
5.4	Vergleich der Spannungsintensitäten der Einschlüsse $K_{\max,E}$ ungestrahlter und makrogestrahlter glatter Proben, jeweils mit und ohne Berücksichtigung von Eigenspannungen	121
5.5	Vergleich der Spannungsintensitäten der FGA, $K_{\max,FGA}$ ungestrahlter und makrogestrahlter glatter Proben, jeweils mit und ohne Berücksichtigung von Eigenspannungen	123
5.6	Lage der zum Versagen führenden Einschlüsse der glat- ten Proben mit unterschiedlichen Oberflächenzuständen, ungestracht milregestracht und mehrogestracht	102
5.7	Bruchfläche mit einer Bruchinitiierung an der Oberfläche und im Volumen mit der Belastung $\sigma_{\rm a} = 626$ MPa und einer Bruchlastspielzahl von $N_{\rm B} = 3, 3 \cdot 10^6$. Spannungsintensität am Einschluss $K_{\rm max,E} = 5$ MPa $\sqrt{\rm m}$. Versuchswerkstoff von	120
5.8	[MS15]	125
0.0	bensdauerverhalten im VHCF-Bereich nach [MYN02] .	128
5.9	Vergleich der simulierten Spannungsverläufe für die verschiedenen Kerbfaktoren bei einer Spannung von $\sigma_a = 645$	
5 10	MPa	128
5.10	Versagen ausgehend an einem nichtmetallischen Einschluss	130

Äquivalente Risslängen der versagenskritischen Einschlüsse	
aller getesteten Versuchsvarianten	130
Spannungsintensitätsfaktoren für Einschlüsse $K_{\max,E}$ aus	
allen getesteten Versuchsreihen über die Lebensdauer, mit	
Einberechnung der lokalen Zugeigenspannungen	132
Prinzipielles Vorgehen zur Auslegung von gekerbten und	
gestrahlten Bauteilen für den VHCF-Bereich	134
Spannungsintensitäten mit Berücksichtigung der Eigenspan-	
nungen für kugelgestrahlte Proben im Vergleich mit Proben,	
deren Verfestigung durch Elektropolieren entfernt wurde	
[NZZZ13]	137
Berechnung der Spannungsintensitäten mit und ohne Be-	
rücksichtigung der Eigenspannungen. Nach [NZZZ13]	137
Lebensdauerversuche eines Wälzlagerstahls im Ausgangszu-	
stand und kugelgestrahlt, mit einer Vorhersage der Wirkung	
von Zugeigenspannungen im Vergleich mit Experimenten	
$[TA02] \ldots \ldots$	138
Spannungsintensitäten von Einschlüssen $K_{\max,E}$ ungestrahl-	
ter, mikrogestrahlter und makrogestrahlter glatter Proben	
über die Bruchlastspielzahl	139
3-D Rekonstruktion eines typischen globularen Einschlusses.	
Rechts wurden die umgebenden konischen Enden entfernt	
$[SFB^+09].$	143
Vergleichsspannung am Einschluss bei unterschiedlichen	
Bedingungen (Form und Interface) $[SFB^+09]$	144
	Äquivalente Risslängen der versagenskritischen Einschlüsse aller getesteten Versuchsvarianten

Tabellenverzeichnis

3.1	Anteil der Legierungselemente in Massen- $\%$	36
3.2	Verwendete Strahlparameter der Druckluftstrahlanlage für das Erzeugen von makroskopischen Eigenspannungen durch	
	Kugelstrahlen mit einer resultierenden Almenintensität von	
	0.29 mmA	43
3.3	Vergleich der gemessenen Einschlussgrößen mit unterschied-	10
	lichen Prüfmethoden	56
4.1	Getestete Versuchsvarianten	59
4.2	Oberflächennahe axiale Druckeigenspannungen, hervorgeru-	
	fen durch Makrostrahlen, gemessen an glatten und gekerbten	
	Proben mit $\alpha_k = 1, 23$ und $\alpha_k = 1, 41$	67
4.3	Berechnete Zugeigenspannungen durch das Makrostrahlen,	
	für die unterschiedlichen Kerbfaktoren α_k der Proben, in	
	Abhangigkeit des Probendurchmessers D und Kerbgrund-	co
4 4	durchinessers a_k	09
4.4	krostrahlen gemessen an Proben mit unterschiedlichen	
	Kerbformzahlen	71
4.5	Berechnete Zugeigenspannungen durch das Mikrostrahlen	
	für die unterschiedlichen Kerbfaktoren α_k der Proben, in	
	Abhängigkeit des Durchmessers D und Kerbgrunddurch-	
	messers d_k	71
4.6	Relative Standardabweichung der Härtemesswerte im Volu-	
	men einer Probe aus Linienmessungen (n>5) $\ldots \ldots$	103
5.1	Belastetes Prüfvolumen der unterschiedlichen Probenvari-	
	anten in mm^3	127

A.1	Präparationsschritte zur Probenvorbereitung für die Härte-	
	messung	154

Allgemeine Formelzeichen und Benennungen

α_k	Kerbformzahl
β_k	Kerbwirkungszahl
$\Delta K_{\rm th, eff}$	effektiver Schwellenwert $\hdots \dots \hdots \dots \hdots MPa\sqrt{m}$
$\Delta K_{\rm th}$	Schwellenwert MPa \sqrt{m}
$\epsilon_{a,t}$	Totaldehnung $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \%$
ϵ_a	Dehnungsamplitude $\ldots \ldots \ldots \ldots $ %
$\epsilon_{\mathrm{m,t}}$	Totalmitteldehnung $\ldots \ldots \ldots \ldots $ %
σ_{aR}	Randspannung MPa
$\sigma_{\rm a}$	Spannungsamplitude MPa
$\sigma_{\rm RWO}$	Oberflächenwechselfestigkeit MPa
$\sigma_{\rm RWV}$	Volumenwechselfestigkeit MPa
$\sqrt{S_{\rm xz}}$	äquivalente Risslänge $\hfill \ldots \hfill mm^2$
<i>A</i>	Bruchdehnung \ldots $\%$
$area_i$	Einschlussfläche μm^2
D	${\rm Durchmesser} \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots {\rm mm}$
$d_{\mathbf{k}}$	Durchmesser im Kerbgrund mm
f	Frequenz Hz
$K_{\max,\mathrm{E}}$	Spannungsintensitätsfaktor Einschluss . $\rm MPa\sqrt{m}$
$K_{\max, FGA}$	Spannungsintensitätsfaktor FGA $\ \ \dots \ \ MPa\sqrt{m}$
K_{\max}	${\rm Spannungsintensit} \" atsfaktor \ \ldots \ \ldots \ MPa\sqrt{m}$
<i>l</i>	Länge mm
$N_{\rm G}$	Grenzlastspielzahl
N_B	Bruchlastspielzahl

R	Lastverhältnis
$R_{\rm a}$	Mittenrauhwert μ m
$R_{\rm es,zykl}$	zyklische Streckgrenze
<i>r</i> _k	Kerbradius mm
$R_{\rm m}$	Zugfestigkeit MPa
$R_{\mathrm{p}0,2}$	Dehngrenze MPa
$R_{\rm z}$	gemittelte Rauhtiefe $\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \mu$ m
$T_{\rm AN}$	$\label{eq:analytical} Anlass temperatur \qquad \dots \qquad ^{\circ} C$
$t_{\rm AN}$	Anlassdauer min
$T_{\rm Aust}$	$Austenitisierungstemperatur ~ \dots ~ ^{\circ} C$
t_{Aust}	Austenitisierungsdauer min
$t_{\mathbf{k}}$	Kerbtiefe mm
HRC	Rockwellhärte
HV	Vikershärte