Vorhersage der Wechselfestigkeit von sprühkompaktierten, schwefellegierten Stählen auf Basis der Mangansulfidgrößenverteilung mit einem erweiterten Fehlstellenmodell

Vom Fachbereich Produktionstechnik

der

UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Jens Schumacher

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. H.-W. Zoch

Prof. Dr. Mag. rer. nat. W. Brannath

Tag der mündlichen Prüfung: 16.07.2015

Forschungsberichte aus der Stiftung Institut für Werkstofftechnik
Bremen

Band 67

Jens Schumacher

Vorhersage der Wechselfestigkeit von sprühkompaktierten, schwefellegierten Stählen auf Basis der Mangansulfidgrößenverteilung mit einem erweiterten Fehlstellenmodell

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag
Aachen 2015

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.: Bremen, Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3843-9
ISSN 1437-7659

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IWT – Stiftung Institut für Werkstofftechnik – in Bremen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Werner Zoch, der es mir ermöglicht hat, meine Dissertation auf dem Gebiet der Werkstofftechnik erstellen zu können. Ich danke für die sorgfältige Durchsicht meiner Arbeit, die konstruktive Kritik und für die Erstellung des Gutachtens.

Herrn Prof. Dr. Mag. rer. nat. Werner Brannath danke ich für die wertvollen Ratschläge sowie für seine Tätigkeit als Gutachter.

Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhfuß, Frau Dr.-Ing. Clausen, Herrn Dipl.-Ing. Eric Moumi und Frau Marina Demin für die Teilnahme am Prüfungsausschuss.

Ein großer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Hubert Bomas, der leider kurz vor der Fertigstellung der Arbeit verstorben ist. Durch seine Anregungen sowie durch zahlreiche fruchtbare Diskussionen hat er maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Darüber hinaus möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Institus für Ihre Unterstützung bedanken. Mein besonderer Dank gilt dabei meinen Kollegen aus der Abteilung Strukturmechanik des IWTs Dr.-Ing. Klaus Burkart, Dipl.-Ing. Christoph Stöberl, Dr. rer. nat. Bernd Köhler und Dipl.-Ing. Torben Karsch für die Fachgespräche und Diskussionen.

Abschließend möchte ich mich ganz herzlich bei meiner Frau Christina für ihre Unterstützung und Motivation, bei meinen Kindern für die Freude, die sie mir bereiten, und bei meinen Eltern Heidrun und Jörg Schumacher, die mir das Studium ermöglicht und damit den Weg zum Erstellen der Arbeit bereitet haben, bedanken.

Bremen, im Juli 2015

Jens Schumacher

Inhalt

Abkürzungen und Symbole VI

1 Einleitung 1

2 Kenntnisstand 3

2.1 Sprühkompaktieren 3

2.1.1 Prinzip des Sprühkompaktierens 3

2.1.2 Modellierung und Prozessparameter 5

2.1.3 Eigenschaften sprühkompaktierter Werkstoffe 9

2.1.3.1 Prozesskette 9

2.1.3.2 Oberfläche der Deposite 10

2.1.3.3 Gasaufnahme 10

2.1.3.4 Poren im Gefüge 10

2.1.3.5 Korngröße und Homogenität 12

2.1.3.6 Gefüge nach Umformung und Wärmebehandlung 13

2.1.3.7 Mechanische Eigenschaften 14

2.2 Mechanische Ermüdung von Stählen 15

2.2.1 Verhalten von Stählen bei zyklischer mechanischer Belastung 15

2.2.1.1 Anrissbildung 16

2.2.1.2 Stabiles Risswachstum 16

2.2.1.3 Restbruch 17

2.2.2 Wöhlerversuch 18

2.2.3 Einflussfaktoren auf die Dauerfestigkeit 20

2.2.3.1 Werkstoffeinfluss 20

2.2.3.2 Beanspruchungseinfluss 22

2.2.3.3 Geometrieeinfluss 24

2.2.3.4 Umgebungseinfluss 26

2.2.4 Erweitertes Fehlstellenmodell 27

2.3 Sulfidische Einschlüsse im Stahl 35

2.3.1 Entstehung 35

2.3.2 Eigenschaften 36
2.4 Ermittlung von Einschlussgrößen 37
2.4.1 Bestimmung der Größenverteilung von Einschlüssen im Volumen 37
2.4.2 Vorhersage des größten Einschlusses in einem Volumen 38
3 Zielsetzung 40
4 Experimentelle Untersuchungen 41
4.1 Material und Methoden 41
4.1.1 Werkstoffe 41
4.1.2 Sprühkompaktieranlage 42
4.1.3 Probenherstellung 42
4.1.4 Zugversuche 43
4.1.5 Schwingversuche 44
4.1.6 Dichtemessung 46
4.1.7 Optische Emissionsspektroskopie 46
4.1.8 Bestimmung des Sauerstoff- und Stickstoffgehalts 47
4.1.9 Lichtmikroskopie 47
4.1.10 Härtemessung 48
4.1.11 Rasterelektronenmikroskopie 48
4.1.12 Rauheitsmessung 49
4.1.13 Eigenspannungen 50
4.2 Sprühkompaktieren 50
4.2.1 Sprühkompaktieren des Stahls 20MnCr5 51
4.2.2 Sprühkompaktieren des Stahls 42CrMo4 52
4.2.3 Sprühkompaktieren des Stahls 100Cr6 53
4.3 Charakterisierung des sprühkompaktierten Materials 54
4.3.1 Chemische Zusammensetzung und Gefüge der sprühkompaktierten Bolzen 54
4.3.1.1 Stahl 20MnCr5 54
4.3.1.2 Stahl 42CrMo4 57

4.3.1.3 Stahl 100Cr6 60
4.3.2 Charakterisierung der warmumgeformten Stangen 63
4.3.3 Charakterisierung der wärmebehandelten Proben 68
4.3.3.1 Probennahme und Wärmebehandlung 68
4.3.3.2 Metallografische Charakterisierung der Zug- und Ermüdungsproben 70
4.3.3.3 Eigenspannungen in den Ermüdungsproben 74
4.3.3.4 Rauheit der Ermüdungsproben 75
4.3.3.5 Sauerstoff- und Stickstoffgehalt der Ermüdungsproben 76
4.4 Zugversuche 76
4.5 Ermüdungsversuche 78
4.5.1 Formzahl und lokale Spannungen der Ermüdungsproben 78
4.5.2 Ermüdungsversuche und Bruchflächenanalysen 82
4.5.2.1 Stahl 20MnCr5 – Wöhlerversuche 82
4.5.2.2 Stahl 20MnCr5 – Bruchflächenuntersuchungen 85
4.5.2.3 Stahl 42CrMo4 – Wöhlerversuche 90
4.5.2.4 Stahl 42CrMo4 – Bruchflächenuntersuchungen 93
4.5.2.5 Stahl 100Cr6 – Wöhlerversuche 98
4.5.2.6 Stahl 100Cr6 – Bruchflächenuntersuchungen 100
4.5.2.7 Kitagawa-Diagramm 105
5 Modellierung der Wechselfestigkeiten 108
5.1 Verteilung der Größe des größten Sulfids im Referenzvolumen 108
5.1.1 Einzelsulfidmethode 108
5.1.1.1 Größenverteilung der Sulfide im Schliff 108
5.1.1.2 Größenverteilung der Sulfide im Volumen 116
5.1.1.3 Größenverteilung des größten Einschlusses im Referenzvolumen 121
5.1.2 Murakami-Methode 124
5.2 Vorhersage der Wechselfestigkeiten und der Versagensorte der Ermüdungsproben 128
5.2.1 Wechselfestigkeit der Proben 128

5.2.2 Berechnung des Versagensorts 136
5.3 Vorhersage der Größe des rissauslösenden Sulfids in den Ermüdungsproben 144
6 Diskussion der Ergebnisse 153
6.1 Herstellung der Ermüdungsproben und Materialcharakterisierung 153
6.2 Wechselfestigkeit der Proben 158
6.3 Vorhersage der Wechselfestigkeit und der Versagensorte 161
6.4 Vorhersage der Größe des größten Einschlusses im hochbeanspruchten Volumen 168
7 Zusammenfassung und Ausblick 176
8 Literaturverzeichnis 181

Abkürzungen und Symbole

Zeichen	Beschreibung	Einheit
a	Federblechdicke	mm
a	halbe Risslänge	m
A	Probenoberfläche	mm^2
A	Bruchdehnung	%
A_0	Referenzoberfläche	mm^2
A_{Bolzen}	Bolzenquerschnittsfläche	mm^2
A_g	Gleichmaßdehnung	%
A_{hoch}	hochbeanspruchte Oberfläche	mm^2
A_{ij}	Matrix mit Faktoren für die Schnittflächen-Kugel-Korrektur nach Scheil und Saltykov	-
$A_{Querschnitt}$	Probenquerschnittsfläche	mm^2
area	Projektionsfläche eines Defektes in der Ebene, die senkrecht zur maximalen Hauptspannung steht	μm^2
$area_{max}$	größte Projektionsfläche von Defekten in der Probe in der Ebene, die senkrecht zur maximalen Hauptspannung steht	μm^2
$A_{Schliff}$	Schliffläche	mm^2
A_{Stange}	Stangenquerschnittsfläche	mm^2
$A_{Sulfide}$	Gesamtfläche der Sulfide in der Schliffläche A_0	mm^2
$A_{Sulfid,Längsschliff}$	Fläche eines Sulfids im Längsschliff, das in der Ebene seiner größten Ausdehnung geschnitten wurde	μm^2
$A_{Sulfid,Querschliff}$	Fläche eines Sulfids im Querschliff, das in der Ebene seiner größten Ausdehnung geschnitten wurde	μm^2
b	Probenbreite	mm
B_{max}	maximale Einschlussbreite	µm
c	Exponent der Fréchet-Verteilung	-
c	Probentiefe	mm
c_A	Streuparameter der Verteilung der äquivalenten Durchmesser der Sulfidschnittflächen im Schliff	-

Zeichen	Beschreibung	Einheit
c_B	Streuparameter der Verteilung der maximalen Breiten der Versagen verursachenden Sulfide in den Ermüdungsproben	-
c_P	Streuparameter der Verteilung der äquivalenten Durchmesser der Versagen verursachenden Sulfide in den Ermüdungsproben	-
c_V	Streuparameter der Verteilung der äquivalenten Durchmesser der Sulfide im Volumen	-
c_{VL}	Streuparameter der Verteilung der äquivalenten Durchmesser der Sulfide im Volumen basierend auf Längsschliffen	-
c_{Vol}	Streuparameter der Verteilung des Sulfideinschlussvolumens	-
c_{VQ}	Streuparameter der Verteilung der äquivalenten Durchmesser der Sulfide im Volumen basierend auf Querschliffen	-
d	Fehlstellengröße, äquivalenter Sulfiddurchmesser	µm
d_0	Median der Einschlussgrößenverteilung	µm
d_{0A}	Median der Einschlussgrößenverteilung der äquivalenten Durchmesser der Sulfidschnittflächen im Schliff	µm
d_{0B}	Median der Einschlussgrößenverteilung der maximalen Breiten der Versagen verursachenden Sulfide in den Ermüdungsproben	µm
d_{0P}	Median der Einschlussgrößenverteilung der äquivalenten Durchmesser der Versagen verursachenden Sulfide in den Ermüdungsproben	µm
d_{0V}	Median der Verteilung der äquivalenten Durchmesser der Sulfide im Volumen	µm
$d_{0,Probe}$	Median des größten äquivalenten Sulfiddurchmessers in der Ermüdungsprobe	µm
$d_{0,V0}$	Median der Verteilung des größten äquivalenten Sulfiddurchmessers im Volumen V_0	µm

Zeichen	Beschreibung	Einheit
$d_{0,VL}$	Median der Einschlussgrößenverteilung der äquivalenten Durchmesser der Sulfide im Volumen basierend auf Längsschliffen	µm
$d_{0,VQ}$	Median der Einschlussgrößenverteilung der äquivalenten Durchmesser der Sulfide im Volumen basierend auf Querschliffen	µm
da	Rissfortschrittsinkrement	m
d_A	Schnittkreisdurchmesser	µm
dA	Oberflächenelement	mm^2
$d_{A,max}$	größter Schnittkreisdurchmesser in der Ebene	µm
dN	Schwingspielinkrement	-
$d_{Sulfid,Längsschliff}$	äquivalenter Durchmesser eines Sulfids im Längsschliff nach der Schnittkreis-Kugel-Korrektur	µm
$d_{Sulfid,Querschliff}$	äquivalenter Durchmesser eines Sulfids im Querschliff nach der Schnittkreis-Kugel-Korrektur	µm
dV	Volumenelement	mm^3
$d_{V,max}$	größter Kugeldurchmesser im Volumen	µm
F	Verteilungsfunktion	-
F_A	Zähigkeitskenngröße der Oberfläche	MPa/HV1
f_{dyn}	dynamischer Maschinenfaktor	-
F_{Last}	Belastung	N
f_{MnS}	Flächenanteil der Mangansulfide	%
$f_{Sulfidvolumen}$	Dichtefunktion der Sulfidvolumenverteilung	-
F_V	Zähigkeitskenngröße des Volumens	MPa/HV1
G	Korngrößen-Kennzahl	-
GMR	Gas-Metall-Massenstromverhältnis (Gas-Metal-Ratio)	-
$G_{Probe,Luft}$	Gewicht der Probe in Luft	N
$G_{Probe,Petroleum}$	Gewicht der Probe in Petroleum	N
h_0	Höhe des Referenzvolumens nach Murakami	mm
HCF	high cycle fatigue (Zeitfestigkeit)	-
H_V	Vickershärte	HV1

Zeichen	Beschreibung	Einheit
$h_{Zylinder}$	Höhe eines zylinderförmigen Sulfids	µm
$H_{\alpha A}$	Einflussfaktor der hydrostatischen Spannung an der Oberfläche	HV1
$H_{\alpha V}$	Einflussfaktors der hydrostatischen Spannung im Volumen	HV1
i	Laufindex	-
I	Flächenträgheitsmoment	mm^4
j	Laufindex	-
k	Anzahl der Größenklassen	-
K_c	kritischer Spannungsintensitätsfaktor	$MPa\sqrt{m}$
K_f	Kerbwirkungszahl	-
K_t	Formzahl	-
LCF	low cycle fatigue (Kurzzeitfestigkeit)	-
L_{max}	maximale Einschlusslänge	µm
m	Exponent der Weibull-Verteilung	-
m	Masse	g
M	Mittelspannungsempfindlichkeit	-
M	molare Masse	g/mol
m_A	Exponent der Weibull-Verteilung der Oberflächen-wechselfestigkeit	-
M_b	Biegemoment	Nm
M_E	Eigenspannungsempfindlichkeit	-
MMC	metal matrix composite	-
m_{Mn}	Masse des Mangans	g
M_{Mn}	molare Masse von Mangan	g/mol
m_{MnS}	Masse des Mangansulfids	g
m_S	Masse des Schwefels	g
M_S	molare Masse von Schwefel	g/mol
$m_{Stahlmatrix}$	Masse der Stahlmatrix	g
m_V	Exponent der Weibull-Verteilung der Volumenwech-selfestigkeit	-

Zeichen	Beschreibung	Einheit
$\dot{m}_G$	Gasmassenstrom	kg/s
$\dot{m}_M$	Metallmassenstrom	kg/s
n	Exponent der bruchmechanischen Beziehung	-
n	Stoffmenge	mol
N_0	korrigierte Anzahl an Sulfiden im Referenzvolumen V_0	-
n_A	Anzahl der Oberflächenelemente der Probe	-
N_{A0}	Anzahl an Sulfiden in der Fläche A_0	-
$N_{A0,i}$	Anzahl an Sulfiden der i-ten Größenklasse in der Fläche A_0	-
N_{Ai}	Anzahl an Schnittkreisen der i-ten Größenklasse pro Einheitsfläche	mm^{-2}
n_B	Anzahl der gebrochenen Proben auf einem Spannungshorizont	-
N_B	Bruchschwingspielzahl	-
n_{BA}	Anzahl an Proben mit Rissausgang an der Oberfläche	-
n_{BV}	Anzahl an Proben mit Rissausgang an Sulfiden im Volumen	-
N_E	Anzahl an Einschlüssen	-
n_G	Anzahl der getesteten Proben auf einem Spannungshorizont	-
N_G	Grenzschwingspielzahl	-
n_i	Anzahl fiktiver Elemente mit gleicher Bruchwahrscheinlichkeit, in die die Probe aufgeteilt wird	-
N_i	Anzahl an Sulfiden der i-ten Größenklasse in der Schliffläche $A_{Schliff}$	-
N_{Kl}	Anzahl der Größenklassen	-
N_T	Anzahl an Teilflächen des Schliffbildes	-
$N_{Ü,A0}$	Überschreitungshäufigkeit in der Einheitsfläche	mm^{-2}
$N_{Ü,V0}$	Überschreitungshäufigkeit im Einheitsvolumen	mm^{-3}

Zeichen	Beschreibung	Einheit
n_V	Anzahl der Volumenelemente zwischen der Oberfläche und der Tiefe x	-
N_{V0}	Anzahl an Sulfiden im Volumen V_0 nach der Schnittkreis-Kugel-Korrektur	-
N_{Vi}	Anzahl an Kugeln der i-ten Größenklasse im Einheitsvolumen	mm^{-3}
N_{Vj}	Anzahl an Kugeln der j-ten Größenklasse im Einheitsvolumen	mm^{-3}
P	Wahrscheinlichkeit	-
P_B	Bruchwahrscheinlichkeit	-
P_B^*	konkurrierende Bruchwahrscheinlichkeit	-
P_{BA}	unabhängige Bruchwahrscheinlichkeit der Oberfläche	-
P_{BA}^*	konkurrierende Bruchwahrscheinlichkeit der Oberfläche	-
P_{Bi}	Bruchwahrscheinlichkeit der i-ten Probe	-
P_{BV}	unabhängige Bruchwahrscheinlichkeit des Volumens	-
P_{BV}^*	konkurrierende Bruchwahrscheinlichkeit des Volumens	-
$P_{B,exp}$	experimentell ermittelte Bruchwahrscheinlichkeit	-
$P_{B,Probe}$	Bruchwahrscheinlichkeit der Probe	-
p_m	mittlere hydrostatische Spannung	MPa
p_{max}	maximale hydrostatische Spannung	MPa
$P_Ü$	Überlebenswahrscheinlichkeit	-
$P_{ÜA}$	unabhängige Überlebenswahrscheinlichkeit der Oberfläche	-
$P_{ÜV}$	unabhängige Überlebenswahrscheinlichkeit des Volumens	-
$P_{Ü,Probe}$	Überlebenswahrscheinlichkeit der Probe	-
q	bruchmechanischer Parameter	-
r	Abstand von der Bolzenachse	mm
R	Bolzenradius	mm

Zeichen	Beschreibung	Einheit
R	Spannungsverhältnis	-
r_i	relative Summenhäufigkeit	-
R_m	Zugfestigkeit	MPa
$R_{p0,2}$	0,2-%-Dehngrenze	MPa
R_z	gemittelte Rautiefe	µm
S	Nennspannung	MPa
S_0	Teilfläche eines Schliffbildes	mm^2
S_a	Nennspannungsamplitude	MPa
S_{aK}	Nennspannungsamplitude im Kerbgrund	MPa
S_b	Biegespannung	MPa
S_D	Dauerfestigkeitsnennspannung	MPa
$S_{D,gekerbt}$	Dauerfestigkeitsnennspannung einer gekerbten Probe	MPa
$S_{D,glatt}$	Dauerfestigkeitsnennspannung einer glatten Probe	MPa
S_K	Nennspannung im Kerbgrund	MPa
S_{max}	maximale Nennspannung	MPa
S_n	Normalspannung	MPa
S_W	Wechselfestigkeitsnennspannung	MPa
t	Abstand des Einschlusses von der Probenoberfläche	µm
t	Prüfquerschnittstiefe	mm
t_{max}	maximaler Abstand des Einschlusses von der Probenoberfläche	µm
t_{min}	minimaler Abstand des Einschlusses von der Probenoberfläche	µm
$T_{Pyrometer}$	Bolzenoberflächentemperatur während des Sprühkompaktierens	°C
V	Probenvolumen, Volumen	mm^3
V_0	Referenzvolumen	mm^3
$V_{0,Sulfid}$	Median der Sulfidvolumenverteilung	$µm^3$
VHCF	very high cycle fatigue (Ermüdungsversuche mit Schwingspielzahlen größer 10^7)	-
V_{hoch}	hochbeanspruchtes Volumen	mm^3

Zeichen	Beschreibung	Einheit
V_{MnS}	Gesamtvolumen aller Mangansulfideinschlüsse im Volumen	cm^3
$V_{Stahlmatrix}$	Volumen der Stahlmatrix	cm^3
V_{Sulfid}	Volumen eines zylindrischen Sulfids	μm^3
$V_{Sulfid,mittel}$	mittleres Sulfidvolumen	μm^3
w_{MnS}	Mangansulfidmassenanteil	Masse-%
$w_{Stahlmatrix}$	Stahlmatrixmassenanteil	Masse-%
x	Abstand zur Kerboberfläche	mm
x_0	Parameter, der den Übergang vom Lang- zum Kurzrissverhalten beschreibt	µm
x_{RO}	Randoxidationstiefe	µm
Y	Geometriefaktor	-
Y_{Kor}	Korrekturfaktor bei der Dichtebestimmung	-
Y_R	Oberflächenfaktor	-
Y_{RO}	Abminderungsfaktor für die Randoxidationstiefe	-
Z	Brucheinschnürung	%
α_A	Empfindlichkeit des Werkstoffs gegenüber der mittleren hydrostatischen Spannung	-
α_V	Empfindlichkeit des Werkstoffs gegenüber der maximalen hydrostatischen Spannung	-
ΔA	Oberflächenelement der Ermüdungsprobe	mm^2
Δd	Klassenbreite	µm
ΔK	Schwingbreite des Spannungsintensitätsfaktors	$MPa\sqrt{m}$
ΔK_{th}	Schwellenwert der zyklischen Rissausbreitung	$MPa\sqrt{m}$
ΔV	Volumenelement der Ermüdungsprobe	mm^3
$\Delta\sigma$	Schwingbreite der Spannung	MPa
γ	Vergleichsgröße einer Schwingfestigkeitshypothese	MPa
γ_A	Vergleichsgröße einer Schwingfestigkeitshypothese für die Probenoberfläche	MPa
γ_V	Vergleichsgröße einer Schwingfestigkeitshypothese für das Probenvolumen	MPa

Zeichen	Beschreibung	Einheit
φ	logarithmischer Umformgrad	-
φ_{MnS}	Volumenanteil der Mangansulfide	%
φ_{Poren}	Porenvolumenanteil	%
ρ_{100Cr6}	Dichte des Stahls 100Cr6	g/cm^3
$\rho_{20MnCr5}$	Dichte des Stahls 20MnCr5	g/cm^3
$\rho_{42CrMo4}$	Dichte des Stahls 42CrMo4	g/cm^3
ρ_{Luft}	Dichte von Luft	g/cm^3
ρ_{MnS}	Dichte von Mangansulfid	g/cm^3
$\rho_{Petroleum}$	Dichte von Petroleum	g/cm^3
ρ_{Probe}	Dichte der Probe	g/cm^3
$\rho_{Stahlmatrix}$	Dichte der Stahlmatrix	g/cm^3
$\rho_{Vollmaterial}$	Dichte des porenfreien Werkstoffs	g/cm^3
σ	lokale Spannung	MPa
σ_a	Spannungsamplitude	MPa
σ_{aK}	Kerbgrundspannungsamplitude	MPa
σ_{av}	Vergleichsspannungsamplitude	MPa
$\sigma_{av,A}$	Vergleichsspannungsamplitude an der Probenoberfläche	MPa
$\sigma_{av,A,max}$	maximale Vergleichsspannungsamplitude an der Oberfläche	MPa
$\sigma_{av,V}$	Vergleichsspannungsamplitude im Probenvolumen	MPa
$\sigma_{av,V,max}$	maximale Vergleichsspannungsamplitude im Volumen	MPa
σ_D	Dauerfestigkeit	MPa
σ_E	Eigenspannungen in Belastungsrichtung der Probe	MPa
σ_K	örtliche Spannung im Kerbgrund	MPa
σ_m	Mittelspannung	MPa
σ_{stat}	örtliche Spannung bei statischer Belastung	MPa
σ_W	Wechselfestigkeit, Wechselfestigkeit der Probe	MPa
σ_{WK}	Kerbgrundwechselfestigkeit	MPa

Zeichen	Beschreibung	Einheit
$\sigma_{WK,längs}$	Kerbgrundwechselfestigkeit bei Belastung in Längsrichtung des Halbzeugs	MPa
$\sigma_{WK,quer}$	Kerbgrundwechselfestigkeit bei Belastung in Querrichtung des Halbzeugs	MPa
$\sigma_{W,A0}$	Wechselfestigkeit der Referenzoberfläche A_0	MPa
$\sigma_{W,defektfrei}$	Wechselfestigkeit des defektfreien Stahls	MPa
$\sigma_{W,UB}$	Umlaufbiegewechselfestigkeit	MPa
$\sigma_{W,V0}$	Wechselfestigkeit des Referenzvolumens V_0	MPa
$\tau_{a,max}$	maximale Schubspannungsamplitude	MPa
τ_W	Schubwechselfestigkeit	MPa
$\tau_{W,A0}$	Schubwechselfestigkeit der Oberfläche A_0	MPa
$\tau_{W,V0}$	Schubwechselfestigkeit des Volumens V_0	MPa