

Berichte des Instituts für Mechanik und Fluidodynamik
Heft 10 (2013)

**Bestimmung von Materialparametern der
elastisch-plastischen Verformung und des spröden Versagens
aus Small-Punch-Kleinstproben**

Stefan Rasche

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	xi
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Zielsetzung	1
1.2 Aufbau der Arbeit	4
2 Literaturüberblick zum Small-Punch-Test	5
2.1 Einführung	5
2.2 Versuchsaufbau und Probenformen	6
2.3 Versuchsdurchführung, -ergebnis und -kennwerte	7
2.4 Materialcharakterisierung mit dem SPT	8
2.4.1 Untersuchte Werkstoffe	8
2.4.2 Empirische Korrelationen mit Kennwerten aus dem SPT	9
2.4.3 Anwendung numerischer Simulationen	10
2.4.4 Experimentelle Weiterentwicklungen	14
3 Forschungsziele und Methoden	15
4 Theoretische Betrachtungen	19
4.1 Kontinuumsmechanische Grundlagen	19
4.1.1 Konfiguration und Bewegung	19
4.1.2 Materielle und räumliche Zeitableitung	21
4.1.3 Deformations- und Verzerrungsmaße	21
4.1.4 Spannungen	26
4.2 Konstitutive Materialgleichungen	27
4.2.1 Linearelastisches Material	27
4.2.2 Elastisch-Plastisches Material mit isotroper Verfestigung	28
4.3 Identifikation konstitutiver Materialparameter	35
4.3.1 Experiment, Simulation, Fehleroptimierung	35
4.3.2 Inverses Problem	36
4.3.3 Nichtlineares Ausgleichsproblem	38
4.3.4 Optimierungsverfahren	39
4.4 Response-Surface-Modellierung	41
4.4.1 Einführung	41
4.4.2 Modellantwort und Versuchsplan	42
4.4.3 Response-Surface-Modelle	43
4.5 Bruchmechanische Grundlagen	45
4.5.1 Rissmodelle und -beanspruchung	45
4.5.2 Konzept der Spannungsintensitätsfaktoren	47

4.5.3	LEBM, Kleinbereichsfließen und EPBM	48
4.5.4	Das J -Integral	50
4.5.5	FEM-Techniken zur Analyse von Rissen	51
4.6	Probabilistische Sprödbruchmodelle	54
4.6.1	Weakest-Link-Theorie und Weibull-Verteilung der Festigkeit	54
4.6.2	Sprödbruchmodell für Keramik	57
4.6.3	Sprödbruchmodell für ferritische Stähle	60
4.6.4	Parameterschätzung mit der Maximum-Likelihood-Methode	64
4.6.5	Weibull-Darstellung	66
5	Experiment	67
5.1	Versuchsauslegung und Konfigurationen	67
5.2	SPT-Apparatur für Tieftemperaturversuche	69
5.3	Untersuchte Werkstoffe	71
5.3.1	Ferritischer Stahl 22NiMoCr37	71
5.3.2	Ferritischer Stahl 18Ch2MFA	73
5.3.3	Lasergeschweißter Stahl 355 EMZ	74
5.3.4	Aluminiumoxidkeramik Rubalit 708S	76
5.4	Probenentnahme und -präparation	76
5.5	Kraft- und Wegmessung	78
5.6	Experimentelle Ergebnisse	78
5.6.1	Stahlwerkstoffe	79
5.6.2	Aluminiumoxidkeramik	84
5.6.3	Bilder der Bruchflächen	86
6	FEM-Simulation des SPT	89
6.1	Gesamtmodell des Versuchs	89
6.1.1	Modellierung der Kontaktsteifigkeit	91
6.1.2	Approximation der Apparaturnachgiebigkeit	91
6.2	Vereinfachtes Modell	93
6.3	Parameterstudie	95
6.3.1	Parametervariation bei elastischem Material	95
6.3.2	Parametervariation bei elastisch-plastischem Material	99
7	Identifikation der Fließkurve	103
7.1	Erläuterung der Vorgehensweise	103
7.2	Parametrische Beschreibung der Fließkurve	107
7.2.1	Fließkurvenansätze	107
7.2.2	Eindeutigkeit der Fließkurvenparameter	108
7.2.3	Bereichsweise lineare Fließkurve	109
7.2.4	Berechnung der Datenbasis	112
7.3	Lokale Approximation der parameterabhängigen Kraft-Verschiebungs-Kurve	113
7.3.1	Mehrdimensionale Interpolation für zwei Parameter	113
7.3.2	Erweiterung auf sechs Parameter	116
7.3.3	Multiple-Responses-Modell für Kraft-Verschiebungs-Kurve	117

7.4	Optimierung der Zielfunktion	118
7.4.1	Residuum und Ableitungen	119
7.4.2	Globale Startwertsuche	121
7.4.3	Gedämpftes Newton-Verfahren	121
7.4.4	Methode des steilsten Abstiegs	124
7.4.5	Globale Suche und Optimierung auf dem Rand	124
7.5	Programm zur Parameteridentifikation	125
7.5.1	Entwicklung des modularen Programms SOFI	125
7.5.2	Beschreibung der Programmmodule	125
7.5.3	Test und Validierung des Programms	129
7.6	Ergebnisse der Parameteridentifikation	131
7.6.1	22NiMoCr37	132
7.6.2	18Ch2MFA	133
7.6.3	Laserschweißnaht	134
7.6.4	Diskussion	134
7.7	Verifikation der identifizierten Materialparameter	135
7.7.1	Vergleich gemessener mit simulierten Kraft-Verschiebungs-Kurven	135
7.7.2	Vergleich identifizierter Fließkurven mit Referenzwerten	138
8	Identifikation probabilistischer Spröbruchparameter	141
8.1	Vorbereitung und Durchführung der Weibull-Parameterschätzung	141
8.2	Numerische Berechnung der Weibull-Spannung und des effektiven Volumens	144
8.3	Weibull-Parameter für Aluminiumoxid-Keramik	145
8.4	Weibull-Parameter des BEREMIN-Modells für Stahl	148
8.4.1	Ergebnisse 22NiMoCr37	149
8.4.2	Ergebnisse 18Ch2MFA	151
8.4.3	Diskussion und numerische Studie	152
8.5	Weibull-Parameter des Modells mit Schwellwert von GAO	155
8.6	Vorhersage der Spröbruchzähigkeit von Stahl	156
8.6.1	Diskussion zur Übertragbarkeit der Weibull-Parameter	156
8.6.2	FE-Simulation der CT-Probe	158
8.6.3	Vorhersage von K_{Jc} für 22NiMoCr37	158
9	Bruchzähigkeitsbestimmung an Keramikproben mit Indenterriss	163
9.1	Bruchzähigkeitsbestimmung mit Härteeindrücken	163
9.2	Vorgehensweise	164
9.3	Erzeugung und Vermessung der Vickers-Risse	165
9.4	Belastung im SPT	167
9.5	FEM-Berechnung des Spannungsintensitätsfaktors an der Rissfront	168
9.6	Abschätzung von K_{Ic}	172
10	Zusammenfassung	173
	Literaturverzeichnis	177

A Anhang	195
A.1 Theoretische Grundlagen	195
A.1.1 Wahrscheinlichkeitsverteilung	195
A.1.2 Volumenabhängigkeit der Sprödbbruchwahrscheinlichkeit	195
A.1.3 Moore-Penrose-Inverse	197
A.2 Zur Auswertung von Messungen	197
A.2.1 Numerische Berechnung der Small-Punch-Bruchenergie	197
A.2.2 Zugversuche für 18Ch2MFA an gekerbten Rundzugproben	198
A.3 FEM-Simulation des SPT	199
A.3.1 FEM-Simulation des SPT mit/ohne Niederhalter	199
A.3.2 Einfluss des Stempelradius auf die Spannung in einer Keramikprobe	201
A.3.3 Parametrisierte ABAQUS-Inputdatei	203
A.3.4 Skriptdatei für Parameterstudie und Datenbasisberechnung	208
A.4 Test des Programms SOFI	208
A.4.1 Reidentifikation von Polynomkoeffizienten	208
A.4.2 Reidentifikation von Parametern des Validierungsmusters	209
A.5 Einzelergebnisse Parameteridentifikation am Beispiel der Laserschweißnaht	211
B Fertigungszeichnungen von Stempel und Matrize	213