

Berichte des Instituts für Mechanik und Fluidodynamik
Heft 32 (2019)

Modellierung des Bruchverhaltens austenitischer TRIP-Stähle

Andreas Burgold

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	7
Abbildungsverzeichnis	11
Tabellenverzeichnis	13
Nomenklatur	15
1 Einleitung	19
1.1 Einführung in die TRIP-Stähle	19
1.2 Stand der Forschung	24
1.3 Motivation und Inhalt der Dissertation	27
2 TRIP-Stahl-Modell nach Prüger	31
2.1 Kinematik und hypoelastische Formulierung	31
2.2 Homogenisierte viskoplastische Antwort	32
2.3 Martensitenentwicklung	33
2.4 Verwendete Materialparameter	35
2.5 Formulierung der Freien Energie für kleine Deformationen	35
3 Rissspitzenfelder und der Einfluss der Phasenumwandlung	39
3.1 Randwertproblem für Kleinbereichsfließen	39
3.2 Die stationäre Lösung	40
3.3 Zur Ratenabhängigkeit	41
3.4 Numerisches Modell	42
3.5 Ergebnisse für ein idealisiertes TRIP-Material	43
3.5.1 Gestalt der Umwandlungszone	44
3.5.2 Spannungen vor der Rissspitze	44
3.5.3 Der Einfluss der Phasenumwandlung	45
3.5.4 Fazit	48
3.5.5 Die Rolle der Verfestigung	48
3.6 Ergebnisse für realistisch verfestigendes TRIP-Material	49
3.6.1 Spannungen vor der abstumpfenden Rissspitze	50
3.6.2 Einfluss der martensitischen Phasenumwandlung	51
3.6.3 Fazit	52
4 Modellvorstellungen zur Zähigkeitssteigerung durch den TRIP-Effekt	53
4.1 Bisherige Erkenntnisse und Diskussion	53
4.1.1 Versagen durch Spaltbruch	53
4.1.2 Versagen durch duktilen Bruch	54
4.2 Thesen zur Zähigkeitssteigerung durch martensitische Phasenumwandlung	54

4.3	Exkurs: Mikromechanische Simulation der duktilen Rissausbreitung . . .	55
4.3.1	Vereinfachtes mikromechanisches Modell	56
4.3.2	Ergebnisse	57
5	Materielle Kräfte unter Berücksichtigung der Phasenumwandlung	61
5.1	Einführung in die Theorie materieller Kräfte	61
5.2	Materielle Kräfte bei inelastischem Materialverhalten	64
5.3	Lokales und globales Gleichgewicht materieller Kräfte	65
5.3.1	Annahmen für dieses Kapitel	65
5.3.2	Divergenz des Energie-Impuls-Tensors der Elastostatik	66
5.3.3	Lokale Gleichgewichtsbedingung	66
5.3.4	Spezieller materieller Volumenkraftvektor für das TRIP-Stahl-Modell	67
5.3.5	Globales Gleichgewicht materieller Kräfte	67
5.3.6	Die materielle Kraft \mathbf{G}_{tip} und ihre Bedeutung	69
5.4	Numerische Berechnung materieller Kräfte im Rahmen der FEM	70
5.4.1	Äquivalentes Gebietsintegral	70
5.4.2	FE-Approximation	72
5.4.3	Vergleich der verwendeten Formulierung mit der Literatur	74
5.4.4	Hinweise zur Implementierung	74
5.5	Numerische Beispiele	75
5.5.1	Kerbzugversuch	75
5.5.2	Rissausbreitung unter Kleinbereichsfließen	78
5.6	Abschließende Bemerkungen	82
5.7	Fazit	84
6	Simulation der Rissausbreitung in TRIP-Stahl mit Hilfe eines Kohäsivzonenmodells	87
6.1	Ausgangssituation	87
6.2	Werkstoffe und experimentelle Methoden	88
6.3	Numerisches Modell	91
6.3.1	Kohäsivzonenmodell	91
6.3.2	Simulation der Rissausbreitung	93
6.3.3	Parameterstudie	94
6.3.4	Hinweise zur Parameteridentifikation	96
6.4	Ergebnisse für den austenitischen Stahl	97
6.5	Ergebnisse für den TRIP-Stahl	102
6.6	Übertragbarkeit der Kohäsivzonenparameter	104
6.7	Fazit	104
7	Modellierung des Deformationsverhaltens der TRIP-Stähle unter zyklischer Beanspruchung	107
7.1	Werkstoff und experimentelle Ergebnisse	107
7.2	Anforderungen an das Materialmodell	110
7.3	Materialmodell für zyklische Beanspruchung	110
7.3.1	Kinematik und hypoelastische Formulierung	110
7.3.2	Interne Variablen	111
7.3.3	Plastisches Fließen	111

7.3.4	Phasenumwandlung	112
7.3.5	Kuhn-Karush-Tucker- und Konsistenzbedingungen	113
7.3.6	Dissipation	113
7.3.7	Verfestigungsregeln	114
7.4	Numerische Lösung der Materialgleichungen	115
7.4.1	Zeitliche Diskretisierung der konstitutiven Gleichungen	115
7.4.2	Numerische Integration der Materialgleichungen	116
7.5	Beispiel einer Parameterbestimmung anhand experimenteller Daten . .	118
7.6	Bewertung der Ergebnisse und Diskussion	122
8	Zusammenfassung	127
	Literatur	129