

Inhaltsverzeichnis

Bezeichnungen	IX
Abkürzungen	XII
Kurzfassung	XIV
Summary	XVI
1 Einleitung	1
1.1 Moderne Umformwerkstoffe	1
1.1.1 Metastabile austenitische CrNi-Stähle	2
1.1.2 Legierungszusammensetzung und Temperatur . . .	3
1.1.3 Stähle mit induzierter Plastizität	5
1.2 Stand Umformtechnologie	9
1.2.1 Tiefziehen mit gezielter Temperaturführung	10
1.2.2 Modellierung von Umformprozessen mit metastabi-	
len rostfreien Stählen	11
1.3 Verbessertes Werkstoffmodell für die industrielle Anwendung	12
1.4 Motivation	14
1.5 Ziel und Inhalt der Arbeit	15
2 Modellierung des metastabilen Verfestigungs- und Fliess-	
verhaltens	18
2.1 Umformtechnische Problematik	18
2.2 Modellierung des Verfestigungsverhaltens	19

2.2.1	Verformungsinduzierte Phasenumwandlung metastabiler CrNi-Stähle	19
2.2.2	Modellierung der Phasenumwandlung metastabiler Stähle	22
2.2.3	Verfestigungsverhalten	34
2.2.4	Beurteilung des Hänsel-Modells	38
2.2.5	Verbesserte Versuchsführung zur Bestimmung der Modellparameter	39
2.2.6	Diskussion verschiedener Einflussgrößen auf die Martensitbildung	48
2.2.7	Verbessertes Konzept zur Bestimmung der Modellparameter mit Matlab	49
2.2.8	Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der Modellverwendung	54
2.3	Modellierung der Fließsorte	55
2.3.1	Quadratischer Fließsort nach Hill48	56
2.3.2	Nichtquadratischer Fließsort nach Barlat89	57
2.3.3	Nichtquadratischer Fließsort YLD2000	58
2.3.4	Analyse verschiedener Fließsortmodelle	60
3	Modellierung des Versagens	65
3.1	Umformtechnische Problematik	65
3.2	Grenzformänderungsschaubild	66
3.2.1	Experimentelle Ermittlung von Grenzformänderungsschaubildern	68
3.2.2	Erfassung der Deformation mittels optischem Messsystem	69
3.2.3	Bestimmung des Versagenszeitpunkts	70
3.2.4	Experimentelle Ermittlung der Versagenskurven für erhöhte Temperaturen	74
3.2.5	Experimentelle Ergebnisse	77
3.3	Virtuelle Versagensvoraussage	84
3.3.1	Klassisches Kraftmaximum-Kriterium	87
3.3.2	Modifiziertes Kraftmaximum-Kriterium	88
3.3.3	eMMFC für die Vorhersage temperaturabhängiger Versagenskurven	89

4	Modellierung des Tribosystems	92
4.1	Umformtechnische Problematik	92
4.2	Tribologisches System	92
4.3	Bestimmung des Reibkoeffizienten durch experimentelle Ver- suche	97
4.3.1	Prinzip des Streifenziehversuchs mit Umlenkung . .	97
4.3.2	Prinzip des Pin-on-Disk-Tests	99
4.3.3	Ergebnisse der Reibwertermittlung bei erhöhten Tem- peraturen	99
4.4	Mathematische Modelle zur Beschreibung der Reibung . .	102
4.4.1	Modellierung des Reibfaktors	102
4.4.2	Modellierung der Reibschubspannung	103
4.5	Reibmodellierung in der FE-Simulation	105
5	Grundlagen der thermo-mechanisch gekoppelten Analyse	107
5.1	Grundlagen der Kontinuumsmechanik	108
5.2	Grundgleichungen der thermo-mechanischen Analyse . . .	109
5.2.1	Thermisch elasto-plastisches Werkstoffgesetz	109
5.2.2	Modellierung der thermischen Situation	111
5.3	Finite Element Methode	114
5.3.1	Diskretisierung	114
5.3.2	Schwache Formulierung der Gleichgewichtsbedingung	115
5.3.3	Zeitintegration	120
6	Validierung des Prozessmodells mit FEM	123
6.1	Materialbeschreibung	124
6.2	Simulationsergebnisse	124
6.2.1	Biaxialer Streckziehversuch mit variabler Stempel- temperatur	124
6.2.2	Biaxialer Streckziehversuch mit variabler Stempel- geschwindigkeit	128
6.2.3	Rotationssymmetrischer Napf	131
6.2.4	Rechteckiger Napf	134
6.3	Vergleich mit anderen Modellbeschreibungen	138
6.4	Beurteilung der Validierungssimulationen	142

7	Sensitivitätsanalyse eines Tiefziehteils	143
7.1	Sensitivitätsanalyse mit AutoForm-Sigma®	144
7.1.1	Modellierung metastabiler austenitischer Stähle mit AutoForm	144
7.1.2	Prozessbeschreibung und Geometrie	145
7.1.3	Prozess-Design-Variablen	146
7.1.4	Auswertung der Simulationsresultate	148
7.1.5	Bewertung der Sensitivitätsanalyse	154
8	Zusammenfassung und Ausblick	155
8.1	Zusammenfassung	155
8.2	Ausblick	157
A	Werkstoffübersicht	160
A.1	Austenitischer Stahl 1.4301, Charge A	160
A.2	Austenitischer Stahl 1.4301, Charge B	161
A.3	Austenitischer Stahl 1.4301, Charge C	162
A.4	Ferritischer Stahl 1.4520	162
A.5	Restaustenitischer Stahl TRIP700	163
B	Temperaturabhängigkeit der Stempelkräfte der Nakajima- Versuche	165
C	Resultate der Sensitivitätsanalyse	171
	Literaturverzeichnis	174