

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	3
2.1	Rohrziehen	3
2.1.1	Verfahrensvarianten beim Rohrziehen	4
2.1.2	Ziehkraft und Anstrengungsgrad	7
2.1.3	Einflussgrößen beim Rohrziehen	8
2.2	Plastische Formänderung	12
2.2.1	Fließkurve	14
2.2.2	Bauschinger-Effekt	16
2.2.3	Anisotropie	18
2.2.4	Eigenspannungen	20
2.3	Tribologie	21
2.3.1	Schmierstoffsysteme	21
2.3.2	Kontaktmechanismen und Reibungszustände	27
2.3.3	Modellversuche	29
2.4	Mathematische Modellierung	32
2.4.1	Kontinuumsmechanik und Thermodynamik	32
2.4.2	Fließfunktion	36
2.4.3	Verfestigung	38
2.4.4	Reibmodelle	45
2.5	FE-Simulation des Rohrziehens	49
3	Zielsetzung und Vorgehensweise	51
4	Experimentelles	53
4.1	Werkstoffe	53
4.2	Methoden und Versuche zur Werkstoffcharakterisierung	55
4.2.1	Bestimmung der Fließkurven	55
4.2.2	Bestimmung des Bauschinger-Effekts	56
4.2.3	Bestimmung der Anisotropie	57
4.2.4	Bestimmung der Eigenspannungen	58
4.3	Schmierstoffcharakterisierung und Reibwertbestimmung	60
4.3.1	Bestimmung der Schmierstoffauflage	60

XI

4.3.2	Bestimmung der Reibwerte	61
4.4	Bauteilversuche auf Ziehmaschine	62
5	Thermo-mechanisches Verhalten des Vergütungsstahls 34MnB5	63
5.1	Charakterisierung und Modellierung der Fließfunktion	63
5.1.1	Charakterisierung der r-Werte im Stauchversuch	63
5.1.2	Charakterisierung der r-Werte mittels Würfelproben	65
5.1.3	Modellierung der Fließfunktion	68
5.2	Charakterisierung und Modellierung der Verfestigung	73
5.2.1	Charakterisierung der Fließkurven	73
5.2.2	Charakterisierung der Rückspannung	76
5.2.3	Modellierung der Verfestigung	79
5.3	Berechnete Werkstoffkenngrößen	82
6	Tribologie beim Rohrziehen	85
6.1	Schmierstoffsystem beim Rohrziehen	85
6.1.1	Einflussgrößen bei der Zinkphosphatierung	85
6.1.2	Einflussgrößen bei der Beseifung	88
6.1.3	Rheologisches Verhalten von Zinkstearat	92
6.2	Tribologischer Modellversuch für das Rohrziehen	93
6.2.1	Beanspruchungskollektiv	93
6.2.2	Stift-Scheibe-Tribometer	96
6.2.3	Probenkörper	98
6.2.4	Charakterisierung der Reibwerte	103
6.3	Reibmodell für das Rohrziehen	106
6.3.1	Einflussgrößen auf die Reibung	106
6.3.2	Modellierung der Reibung	110
6.3.3	Phänomenologisches Reibmodell	113
7	Prozessmodellierung und FE-Simulation	119
7.1	Prozessmodellierung	119
7.2	Simulationsergebnisse und experimentelle Validierung	121
7.2.1	Ziehkraft	122
7.2.2	Temperatur	123
7.2.3	Rohrdimension	126
7.2.4	Kaltverfestigung	129
7.2.5	Eigenspannungen	131
8	Zusammenfassung und Ausblick	135