

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 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 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 | Bestimmung der r -Werte im Stauchversuch | 63 |
| 5.1.2 | Bestimmung der r -Werte von Rohren mittels Würfelproben | 65 |
| 5.1.3 | Modellierung der Fließfunktion | 68 |
| 5.2 | Charakterisierung und Modellierung der Verfestigung | 73 |
| 5.2.1 | Bestimmung der Fließkurven | 73 |
| 5.2.2 | Bestimmung 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 | Reibwertbestimmung | 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 |