

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|------------|
| Vorabveröffentlichungen von Inhalten | V |
| Formelzeichen und Abkürzungen | VII |
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Stand der Technik | 3 |
| 2.1 Grundlagen thermisch gestützter Umformprozesse | 3 |
| 2.1.1 Elastisches und plastisches Umformverhalten | 3 |
| 2.1.2 Gefügeänderungen bei der Warmumformung | 6 |
| 2.1.3 Thermische Behandlung metallischer Werkstoffe | 9 |
| 2.2 Charakterisierungsmethoden bei erhöhten Temperaturen | 14 |
| 2.2.1 Ermittlung und Einflussfaktoren auf das Fließverhalten | 14 |
| 2.2.2 Bestimmung von Versagenskriterien | 16 |
| 2.3 Innenhochdruck-Warmumformung von Rohren | 18 |
| 2.3.1 Wirkmedien – Einteilung und Limitierungen | 18 |
| 2.3.2 Prozessverfahren und -varianten | 19 |
| 2.3.3 Thermisch basierte Umformung mittels Innendruck | 21 |
| 2.4 Innenhochdruck-Charakterisierung von Rohren | 24 |
| 2.4.1 Beschreibung der Spannungs-Dehnungszustände | 24 |
| 2.4.2 Bestimmung von Versagenskriterien | 26 |
| 2.5 Fazit aus dem Stand der Technik | 28 |
| 3 Zielsetzung | 29 |
| 4 Prozessauslegung und Randbedingungen | 31 |
| 4.1 Prozessanforderungen und -gestaltung | 31 |
| 4.2 Werkstoffauswahl | 33 |
| 4.2.1 Werkstückwerkstoff | 33 |
| 4.2.2 Matrizenwerkstoff | 34 |
| 4.3 Anforderungen an die Werkstoffcharakterisierung | 35 |
| 4.3.1 Ermittlung temperaturabhängiger Emissionskoeffizienten | 36 |
| 4.3.2 Temperaturverteilung konduktiv erwärmter Rohre | 37 |
| 4.4 Zwischenfazit | 38 |
| 5 Charakterisierung thermisch-mechanischer Eigenschaften | 39 |
| 5.1 Ermittlung des Fließverhaltens durch Warmzugversuche | 40 |
| 5.1.1 Versuchsaufbau und -durchführung | 40 |
| 5.1.2 Bestimmung temperaturabhängiger Elastizitätsmoduln | 41 |
| 5.1.3 Bestimmung und Extrapolation von Fließkurven | 41 |
| 5.1.4 Ableiten notwendiger Drücke für die Innenhochdruck-Umformung | 43 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 5.1.5 | Charakterisierung der thermischen Entfestigung | 44 |
| 5.2 | Temperaturabhängige Gefügeentwicklung | 46 |
| 5.3 | Untersuchung tribologischer Bedingungen..... | 48 |
| 5.4 | Zwischenfazit | 50 |
| 6 | Hochtemperatur-Werkstoffcharakterisierung von Rohren | 51 |
| 6.1 | Bestimmung von Versagenskriterien | 51 |
| 6.1.1 | Expansionsversuch (HTB-Test) – Versuchsstand und Prozessparameter .. | 52 |
| 6.1.2 | Rohrzugversuch (PTT-Test) – Versuchsstand und Prozessparameter | 56 |
| 6.1.3 | Auswertmethodik der Grenzformänderung..... | 59 |
| 6.1.4 | Grenzformänderungsschaubilder bei erhöhten Temperaturen | 67 |
| 6.2 | Fließkurvenermittlung mittels Expansionsversuch | 69 |
| 6.2.1 | Analytische Beschreibung und Auswertung der Fließkurven..... | 69 |
| 6.2.2 | Experimentelle Regelung der Dehnrate | 72 |
| 6.2.3 | Auswertung und Extrapolation der Fließkurven | 76 |
| 6.3 | Zwischenfazit | 79 |
| 7 | Isotherme Innenhochdruck-Pneumoumformung | 81 |
| 7.1 | Prozessablauf und -parameter | 81 |
| 7.2 | Numerische Prozessanalyse | 84 |
| 7.2.1 | Aufbau des numerischen Modells | 84 |
| 7.2.2 | Analyse des Umformprozesses | 86 |
| 7.2.3 | Einfluss relevanter Prozessparameter auf die Ausformung | 90 |
| 7.3 | Experimentelle Modellvalidierung | 96 |
| 7.4 | Ableiten von Prozessfenstern..... | 102 |
| 7.5 | Einstellung von Produkteigenschaften | 104 |
| 7.6 | Zwischenfazit | 106 |
| 8 | Druckgestütztes-Hochtemperatur-Profilbiegen | 109 |
| 8.1 | Theoretische Prozessauslegung..... | 109 |
| 8.2 | Numerische Prozessanalyse | 110 |
| 8.2.1 | Bestimmung der thermischen Randbedingungen..... | 110 |
| 8.2.2 | Aufbau des Modells..... | 112 |
| 8.2.3 | Numerische Analyse der Umformung..... | 114 |
| 8.3 | Experimentelle Prozessumsetzung..... | 117 |
| 8.3.1 | Validierung des numerischen Modells | 117 |
| 8.3.2 | Maßhaltigkeit der Biegeradien | 120 |
| 8.4 | Ableiten von Prozessfenstern..... | 121 |
| 8.5 | Zwischenfazit | 123 |
| 9 | Zusammenfassung und Ausblick | 125 |
| 10 | Literaturverzeichnis | 127 |

| | |
|-------------------|--|
| Anhang | 139 |
| Anhang A | Extrapolationskoeffizienten 139 |
| Anhang B | MATLAB-Skript für die Radienauswertung 140 |
| Anhang C | Python Skript zur Auswertung der Wandstärkenverläufe 141 |
| Anhang D | Thermische Werkstoffkennwerte 144 |
| Lebenslauf | 145 |