

FREIBERGER FORSCHUNGSHEFTE
Herausgegeben vom Rektor der TU Bergakademie Freiberg

B 356 Werkstofftechnologie

**Beiträge zur Erzeugung
hochmaßhaltiger flanschloser Halbschalen
für geschlossene Profile**

Konstantinos Savvas

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Motivation | 1 |
| 1.2 | Problemstellung | 3 |
| 1.3 | Zielsetzung | 5 |
| 2 | Stand der Technik | 6 |
| 2.1 | Spannungszustand | 6 |
| 2.2 | Rückfederung | 10 |
| 2.2.1 | Ausgewählte Arbeiten zur Rückfederung | 13 |
| 2.2.2 | Rückfederung beim Tiefziehen | 13 |
| 2.2.3 | Mechanismen und Einflussgrößen der Rückfederung | 17 |
| 2.2.4 | Eigenstressen | 19 |
| 2.3 | Ansätze zur Minimierung der Rückfederung | 23 |
| 2.3.1 | Umformverfahren | 24 |
| 2.3.2 | Umformtemperatur | 33 |
| 2.3.2.1 | Direkte Warmformgebung | 33 |
| 2.3.2.2 | Indirekte Warmformgebung | 35 |
| 2.3.2.3 | Halbwarmformgebung | 37 |
| 2.3.3 | Experimentelle Verfahrensoptimierung | 38 |
| 2.3.4 | Numerische Verfahrensoptimierung | 41 |
| 2.3.5 | Neue Verfahrensidee der ThyssenKrupp Steel Europe AG | 47 |
| 3 | Grundlagen und Theoretische Betrachtungen | 50 |
| 3.1 | Mechanisches Verhalten metallischer Werkstoffe | 50 |
| 3.2 | Elastizität | 51 |
| 3.3 | Plastizität | 52 |
| 3.3.1 | Fließfunktion | 53 |
| 3.3.2 | Fließgesetz | 56 |
| 3.3.3 | Verfestigungsgesetz | 58 |
| 3.4 | Grenzformänderungs- und -spannungsdiagramm | 62 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4 | Modell zur Rückfederungsminimierung | 66 |
| 4.1 | Nachweis der Spannungsausrichtung | 66 |
| 4.1.1 | Elastisch-plastische Biegung | 68 |
| 4.1.1.1 | Elastisch-plastische Biegung ohne Kalibrierung | 68 |
| 4.1.1.2 | Elastisch-plastische Biegung mit Kalibrierung | 71 |
| 4.2 | Verifikation der analytischen Berechnung | 73 |
| 5 | Halbschalentechnik-Verfahrensentwicklung | 76 |
| 5.1 | Werkstoffcharakterisierung | 76 |
| 5.2 | Experimentelle Untersuchungen | 78 |
| 5.2.1 | Vierstufiger Ansatz | 78 |
| 5.2.1.1 | Versuchsaufbau- und -durchführung | 78 |
| 5.2.1.2 | Versuchsauswertung | 83 |
| 5.2.2 | Optimierter dreistufiger Ansatz | 91 |
| 5.2.2.1 | Versuchsaufbau- und -durchführung | 92 |
| 5.2.2.2 | Versuchsauswertung | 95 |
| 5.2.2.3 | Zusammenfassung der Erkenntnisse | 109 |
| 5.2.3 | Realbauteil- komplexes Trägerprofil | 111 |
| 5.2.3.1 | Versuchsvorbereitung | 111 |
| 5.2.3.2 | Versuchsdurchführung | 113 |
| 5.2.3.3 | Auswertung | 114 |
| 5.2.4 | Integrierter Beschnitt | 116 |
| 5.2.4.1 | Optimierte Schneidengeometrie | 117 |
| 6 | Numerische Untersuchungen | 125 |
| 6.1 | Finite-Elemente Methode | 125 |
| 6.1.1 | Numerische Integrationsverfahren | 127 |
| 6.2 | Anforderungen an FE-Software | 130 |
| 6.3 | Numerische Variationsrechnungen – „HAST“ – | 131 |
| 6.3.1 | Benchmark | 133 |
| 6.3.1.1 | Variationsrechnungen | 136 |
| 6.3.1.2 | Spaltuntersuchungen | 145 |
| 6.3.1.3 | Zusammenfassung der Erkenntnisse | 147 |

| | |
|---------------------------------------|------------|
| 7 Zusammenfassung und Ausblick | 149 |
| Literaturverzeichnis | 152 |