

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|----------|
| 1 | Grundlagen der Blechumformung | 1 |
| 1.1 | Einleitung | 1 |
| 1.1.1 | Klassifizierung der Verfahren der Umformtechnik | 3 |
| 1.1.2 | Prozessbeschreibung | 5 |
| 1.2 | Tribologie | 6 |
| 1.2.1 | Reibungsformen | 6 |
| 1.2.2 | Tribologisches System | 7 |
| 1.2.3 | Verschleißmechanismen | 8 |
| 1.2.4 | Schmierung | 8 |
| 1.2.5 | Parameter, die die Reibung beeinflussen | 9 |
| 1.2.6 | Einfluss des Schmierstoffes auf die Reibung | 10 |
| 1.2.7 | Einfluss der Blech-Oberflächenstruktur auf die Reibung | 11 |
| 1.2.8 | Blechoberflächen | 12 |
| 1.2.9 | 2D-Oberflächenbeschreibung | 17 |
| 1.2.10 | Beschreibung von Blechoberflächen | 19 |
| 1.3 | Spannung, Formänderung, Umformgeschwindigkeit und Umformbeschleunigung | 25 |
| 1.3.1 | Kraft-Längenänderungs-Diagramm des einachsigen Zugversuchs | 25 |
| 1.3.2 | Spannungs-Dehnungs-Diagramm des einachsigen Zugversuchs | 26 |
| 1.3.3 | Logarithmische Formänderungen | 29 |
| 1.3.4 | Logarithmische Formänderungsgeschwindigkeit | 30 |
| 1.3.5 | Logarithmische Formänderungsbeschleunigung | 31 |
| 1.3.6 | Logarithmische Hauptformänderung, logarithmische Hauptformänderungsgeschwindigkeit und logarithmische Hauptformänderungsbeschleunigung | 31 |
| 1.3.6.1 | Logarithmische Hauptformänderung | 31 |
| 1.3.6.2 | Logarithmische Hauptformänderungsgeschwindigkeit | 31 |
| 1.3.6.3 | Logarithmische Hauptformänderungsbeschleunigung | 31 |
| 1.4 | Fließgesetz | 32 |
| 1.5 | Anisotropie | 32 |
| 1.6 | Fließkurve | 36 |
| 1.6.1 | Fließspannung | 36 |
| 1.6.2 | Ermittlung des Einsetzens plastischen Fließens | 38 |
| 1.6.3 | Hydraulisches und pneumatisches Tiefen | 39 |

| | | |
|---------|--|-----------|
| 1.6.4 | Kaltumformung | 43 |
| 1.6.5 | Halbwarm-Umformung | 44 |
| 1.6.6 | Warmumformung | 47 |
| 1.6.7 | Superplastische Blechumformung, ein Verfahren der Warm-Umformung | 48 |
| 1.7 | Fließbedingungen (Fließhypothesen) | 50 |
| 1.8 | Fließortfläche, Fließortkurve | 52 |
| 1.9 | Grenzformänderungsdiagramm | 53 |
| 1.9.1 | Ermittlung der Grenzformänderungskurven | 54 |
| 1.9.2 | Markieren von Kreisrastern | 60 |
| 1.9.2.1 | Elektrochemisches Markieren von Kreisrastern | 60 |
| 1.9.2.2 | Lasermarkieren von Kreisrastern | 60 |
| 1.9.3 | Anwendung des Grenzformänderungsdiagramms bzw. der Grenzformänderungskurve | 61 |
| 1.9.3.1 | Optimierung von Formänderungspfaden | 62 |
| 1.9.3.2 | Umformbarkeit | 62 |
| 1.9.3.3 | Prozesssicherheit (Robuster Fertigungsprozess) | 64 |
| 1.9.4 | Unterstützung des Eintuschierns von Ziehwerkzeugen | 65 |
| 1.10 | Erweiterung des Grenzformänderungsdiagramms | 66 |
| 1.10.1 | Logarithmische Dickenformänderung | 66 |
| 1.10.2 | Logarithmische Hautformänderung φ_g | 68 |
| 1.11 | Dokumentation der Produktgüte | 71 |
| | Literatur | 71 |
| 2 | Streckziehen | 73 |
| 2.1 | Einfaches Streckziehen | 73 |
| 2.2 | Tangential-Streckziehen | 77 |
| 2.3 | Cyril-Bath-Streckziehanlage | 79 |
| 2.4 | NC-steuerbares segmentiertes Streckziehen | 81 |
| | Literatur | 84 |
| 3 | Tiefen | 85 |
| 3.1 | Tiefen rotationssymmetrischer halbkugelförmiger Blechformteile | 85 |
| 3.1.1 | Tiefungsverfahren | 85 |
| 3.1.2 | Tiefungskennwert | 86 |
| 3.2 | Mechanisches Tiefen nicht-rotationssymmetrischer Blechformteile | 87 |
| 3.3 | Hydraulisches Tiefen | 88 |
| 3.3.1 | Hydraulisches Tiefen halbkugelförmiger Blechformteile | 89 |
| 3.3.2 | Hydraulisches Tiefen nicht-rotationssymmetrischer Blechformteile | 89 |
| 3.3.3 | Kombination von hydraulischem Tiefen und hydromechanischem Tiefziehen | 92 |

| | | |
|-------|--|------------|
| 3.3.4 | Kombination von konventionellem Tiefziehen und hydraulischem Tiefen | 93 |
| 3.4 | Pneumatisches Tiefen | 96 |
| 3.4.1 | Superplastische Umformung | 96 |
| 3.4.2 | Matrizenverfahren | 97 |
| 3.4.3 | Patrizenverfahren | 98 |
| 3.4.4 | Anwendungen | 98 |
| | Literatur | 99 |
| 4 | Tiefziehen | 101 |
| 4.1 | Tiefziehen rotationssymmetrischer Blechformteile | 101 |
| 4.1.1 | Verfahrensablauf und Werkzeuggestaltung | 101 |
| 4.1.2 | Geometrische Verhältnisse | 104 |
| 4.1.3 | Einsatz eines Niederhalters | 105 |
| 4.1.4 | Spannungsverhältnisse | 106 |
| 4.1.5 | Tiefziehverhältnisse | 109 |
| 4.1.6 | Ziehpalt | 109 |
| 4.1.7 | Ermittlung der mittleren Fließspannung | 112 |
| 4.1.8 | Ziehstempel-Teilkräfte und Ziehstempel-Gesamtkraft | 114 |
| 4.1.9 | Arbeitsdiagramm der Niederhalterkraft | 119 |
| 4.2 | Tiefziehen nicht-rotationssymmetrischer Blechformteile | 120 |
| 4.2.1 | Ziehprozess | 120 |
| 4.2.2 | Zieheinrichtungen im Pressentisch | 121 |
| 4.2.3 | Steuerung des Werkstoffflusses | 123 |
| 4.2.4 | Tribologisches System im Niederhalterbereich | 124 |
| 4.2.5 | Verteilung Flächenpressung unter dem Niederhalter | 125 |
| 4.2.6 | Segmentelastischer Niederhalter | 126 |
| 4.2.7 | Prismatisch verrippte Matrize | 128 |
| 4.2.8 | Ziehwerkzeuge mit integrierter Zieheinrichtung | 129 |
| 4.3 | Hydromechanisches Tiefziehen | 131 |
| 4.3.1 | Verfahrensprinzip | 131 |
| 4.3.2 | Verlauf des Gegendrucks über dem Stempelweg | 132 |
| 4.3.3 | Bildung einer Wulst entgegen Tiefziehrichtung | 133 |
| 4.3.4 | Kräfte beim hydromechanischen Tiefziehen | 135 |
| 4.3.5 | Einfluss des Gegendrucks | 136 |
| 4.3.6 | Grenzziehverhältnisse beim hydromechanischen Tiefziehen | 136 |
| 4.3.7 | Einsatz von segmentelastischen Niederhaltern und Vielpunkt-Zieheinrichtungen beim hydromechanischen Tiefziehen | 136 |
| 4.3.8 | Tendenzen und Zielsetzungen | 138 |
| | Literatur | 139 |

| | |
|--|------------|
| 5 Blechbiegen | 141 |
| 5.1 Einleitung | 141 |
| 5.2 Grundlagen des Blechbiegens | 144 |
| 5.2.1 Berechnungsmethoden | 145 |
| 5.2.2 Formänderungen, Spannungen und Biegemomente für das elastisch-plastische Biegen mit reinen Momenten | 145 |
| 5.2.3 Rückfederung beim reinen Momentenbiegen | 149 |
| 5.2.4 Erweiterungen der elementaren Theorie zur Berechnung des reinen Momentenbiegents | 153 |
| 5.2.5 Mehrachsige Berechnungsansätze | 155 |
| 5.3 Einfluss- und Störgrößen | 157 |
| 5.4 Prozess-Simulation und Prozessplanung | 161 |
| 5.4.1 Kollisionskontrolle und Biegefolgenbestimmung | 162 |
| 5.4.2 Werkstückhandhabung | 164 |
| 5.4.3 Prozess-Simulation und NC-Datenbestimmung | 164 |
| 5.4.4 Analytische und halbanalytische Verfahren | 166 |
| 5.4.5 Finite-Elemente-Methode | 170 |
| 5.4.6 Zuschnittsermittlung | 172 |
| 5.4.7 Fertigungsgrenzen und Fertigungsfehler | 175 |
| 5.5 Prozessregelung | 176 |
| 5.6 Qualitätskriterien für Blechbiegeteile | 182 |
| 5.7 Blechbiegeverfahren | 183 |
| 5.7.1 Frei- und Gesenkbiegen | 184 |
| Freibiegen | 184 |
| Prägebiegen im V-Gesenk | 187 |
| Biegen mit elastischen Matrizen | 189 |
| Dreipunktbiegen | 190 |
| U-Biegen mit und ohne Gegenhalter | 191 |
| Z- oder N-Biegen | 194 |
| Maschinen- und Werkzeuge zum Frei- und Gesenkbiegen | 194 |
| 5.7.2 Schwenkbiegen | 199 |
| 5.7.3 Walzrunden | 201 |
| 5.7.4 Walzprofilieren | 204 |
| 5.8 Falzen und Bördeln | 210 |
| 5.8.1 Falzen | 210 |
| 5.8.2 Bördeln | 212 |
| 5.9 Biegerichten | 214 |
| Literatur | 216 |
| 6 Schneiden | 223 |
| 6.1 Zerteilen | 223 |
| 6.2 Scherschneiden (Normalschneiden) | 226 |

| | | |
|-----------------|---|------------|
| 6.2.1 | Einführung | 226 |
| 6.2.2 | Ablauf des Scherschneidvorgangs | 227 |
| 6.2.3 | Schnittflächenkenngrößen | 229 |
| 6.2.4 | Schneidkraft | 230 |
| 6.2.4.1 | Kräfte beim Scherschneiden | 230 |
| 6.2.4.2 | Einflussgrößen auf die Schneidkraft | 233 |
| 6.2.4.3 | Schneidkraft-Stempelweg-Verlauf | 235 |
| 6.2.5 | Verschleiß und Verschleißminderung | 238 |
| Literatur | | 239 |
| 7 | Feinschneiden | 241 |
| 7.1 | Einführung | 241 |
| 7.2 | Grundlagen des Feinschneidens | 242 |
| 7.2.1 | Verfahrensablauf | 242 |
| 7.2.2 | Schnittflächenqualität | 244 |
| 7.2.3 | Verfahrensmerkmale | 245 |
| 7.3 | Schnittteilgestaltung und Bauteilwerkstoffe | 249 |
| 7.4 | Werkzeuge | 251 |
| 7.5 | Pressentechnik | 252 |
| Literatur | | 256 |
| 8 | Finite Elemente Methode (FEM) Prozess-Simulation in der Blechumformung | 257 |
| 8.1 | Finite Elemente Methode (FEM) Prozess-Simulation in der Blechumformung | 257 |
| 8.1.1 | Stand der Technik | 257 |
| 8.1.2 | Geschichtliche Entwicklung | 257 |
| 8.1.3 | Heutiger Stand und Entwicklungstendenzen im Bereich der Blechumformung | 258 |
| 8.1.4 | Alternative numerische Methoden | 260 |
| 8.2 | Numerische Modellierung von umformtechnischen Prozessen | 261 |
| 8.2.1 | Nichtlineare, zeitlich abhängige Randwertprobleme | 261 |
| 8.2.2 | System gekoppelter partieller Differentialgleichungen | 262 |
| 8.2.3 | Inhalt des Kapitels | 262 |
| 8.3 | Kontinuumsmechanische Grundlagen | 263 |
| 8.3.1 | Modellierung des Bewegungs- und Deformationszustandes | 263 |
| 8.3.2 | Dehnungsmaße | 264 |
| 8.3.3 | Spannungsmaße | 266 |
| 8.3.4 | Energetisch konjugierte Spannungs- und Dehnungsmaße | 267 |
| 8.3.5 | Kontinuitätsbedingung | 268 |
| 8.3.6 | Werkstoffgesetz | 268 |
| 8.3.7 | Impulsbilanz und Gleichgewichtsbedingungen | 270 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 8.3.8 | Wärmeleitung und Energiebilanz | 270 |
| 8.3.9 | Zusammenfassung der prozessbeschreibenden differentiellen Gleichungen | 271 |
| 8.4 | Finite Elementformulierung | 272 |
| 8.4.1 | Zeitliche und örtliche Diskretisierung des Problems | 272 |
| 8.4.2 | Elementformulierungen | 273 |
| 8.4.2.1 | Grundlage der isoparametrischen Elemente | 273 |
| 8.4.2.2 | Eigenschaften von Schalenelementen | 274 |
| 8.4.2.3 | Methoden zur Integration der Elementeigenschaften | 276 |
| 8.5 | Implizite quasistatische FEM-Verfahren | 278 |
| 8.5.1 | Schwache Formulierung des Problems | 278 |
| 8.5.1.1 | Überführung in eine integrale Form (Galerkin-Ansatz) | 278 |
| 8.5.1.2 | Herleitung nach dem Variationsprinzip | 280 |
| 8.5.2 | Iterative Lösungsverfahren des impliziten Problems | 281 |
| 8.6 | Lösung von thermo-mechanisch gekoppelten Problemen | 282 |
| 8.6.1 | Anwendungsgebiete in der Blechumformung | 282 |
| 8.6.2 | FEM-Formulierung und Lösungsvorgehen | 282 |
| 8.6.3 | Modellierung thermischer Randbedingungen | 284 |
| 8.7 | Explizite FEM-Verfahren | 284 |
| 8.8 | Vergleich der expliziten und impliziten Methoden | 286 |
| 8.9 | Modellierung der Kontaktbedingung | 287 |
| 8.9.1 | Beschreibung der Werkzeuggeometrie | 287 |
| 8.9.1.1 | Starre und deformierbare Kontaktflächen | 287 |
| 8.9.1.2 | Diskrete und glatte Kontaktflächen | 288 |
| 8.9.2 | Kontaktsuche und Kontakttoleranzen | 288 |
| 8.9.3 | Mathematische Behandlung von Verschiebungsrandbedingungen | 289 |
| 8.9.4 | Modellierung der Reibkräfte | 290 |
| 8.9.4.1 | Reales Reibverhalten bei Blechumformprozessen | 290 |
| 8.9.4.2 | Mathematische Reibmodelle | 290 |
| 8.9.4.3 | Numerische Implementierung | 292 |
| 8.10 | Materialmodelle und Materialdaten | 293 |
| 8.10.1 | Spezifikation des Verfestigungsverhaltens | 294 |
| 8.10.1.1 | Kaltfließkurven | 294 |
| 8.10.1.2 | Erweiterte Fließkurvenmodelle zur Beschreibung von Dehnraten und Temperatureinflüssen | 295 |
| 8.10.1.3 | Verfestigungsverhalten von metastabilen TRIP-Stählen | 295 |
| 8.10.1.4 | Modellierung des Presshärtevorganges | 296 |
| 8.10.2 | Fließortkurve und Anisotropie | 297 |
| 8.10.2.1 | Hill 1948-Modell | 298 |
| 8.10.2.2 | Nicht-quadratische Fließortkurvenmodelle | 298 |
| 8.10.2.3 | Fließortkurven-Modelle für Metalle mit hexagonaler (hex)Gitterstruktur | 300 |

| | |
|---|------------|
| 8.10.2.4 Beschreibung des kinematischen und anisotropen Verfestigungsverhaltens | 301 |
| 8.10.3 Versagensvoraussage | 301 |
| 8.10.3.1 Simulation von Falten und Einfallstellen | 302 |
| 8.10.3.2 Voraussage von Grenzdehnungszuständen | 302 |
| Verzeichnis der Symbole und Abkürzungen | 305 |
| Literatur | 306 |
| 9 Fließkriterien | 309 |
| 9.1 Fließkriterien – Definition | 310 |
| 9.1.1 von Mises-Fließkriterium | 313 |
| 9.1.2 Hill'48 Fließkriterium | 313 |
| 9.1.3 Barlat 1989 Fließkriterium | 315 |
| 9.1.4 BBC 2005 Fließkriterium | 316 |
| 9.2 Empfehlungen zur Auswahl eines Fließkriteriums | 318 |
| 9.2.1 Mechanische Parameter für die Fließkriterien | 318 |
| 9.3 Ausblick | 320 |
| Literatur | 321 |
| Sachverzeichnis | 323 |