
Inhalt

| | |
|--|----|
| Vorwort | V |
| 1 Einführung | 1 |
| 2 Das physikalische Verhalten der Kunststoffe | 5 |
| 2.1 Zustandsdiagramm amorpher Thermoplaste | 5 |
| 2.2 Zustandsdiagramm teilkristalliner Thermoplaste | 7 |
| 2.3 Zustandsdiagramm vernetzter Duroplaste | 9 |
| 2.4 Mechanische Eigenschaften im festen Zustand | 10 |
| 2.4.1 Elastische Verformung | 10 |
| 2.4.2 Lineare viskoelastische Verformung | 10 |
| 2.4.3 Zeitabhängige viskose Verformung | 14 |
| 2.4.3.1 Zügige einachsige Zugbeanspruchung | 14 |
| 2.4.3.2 Einachsige langzeitige statische Zugbeanspruchung | 19 |
| 2.5 Festkörper-Reibung | 21 |
| 2.6 Rheologisches Werkstoffverhalten | 22 |
| 2.6.1 Scherviskosität | 22 |
| 2.6.2 Dehnviskosität | 26 |
| 2.7 Thermodynamische Zustandsänderungen und Zustandsgrößen | 28 |
| 2.7.1 Thermische Zustandseigenschaften | 28 |
| 2.7.2 Kalorische Zustandseigenschaften | 30 |
| 2.7.3 Leitungseigenschaften | 33 |
| 2.8 Akustische Eigenschaften | 34 |
| 2.9 Elektrische Eigenschaften | 37 |
| 3 Adhäsion | 41 |
| 3.1 Adhäsionsarten | 41 |
| 3.2 Zwischenmolekulare und zwischenatomare Wechselwirkungen | 41 |
| 3.3 Thermodynamik der Oberflächen | 43 |
| 3.3.1 Oberflächenenergie, Adhäsionsarbeit und Kohäsionsenergie | 43 |
| 3.3.2 Gleichgewichtsbedingungen | 44 |
| 3.3.3 Grenzflächenenergie | 46 |
| 3.3.4 Gleichungen zur Bestimmung der Grenzflächenspannung | 48 |
| 3.3.4.1 Zweiparametergleichungen | 48 |
| 3.3.4.2 Vierparametergleichungen | 50 |
| 3.3.4.3 Sechsparametergleichungen | 51 |
| 3.4 Adhäsionsbedingungen auf der Basis der Oberflächenenergien | 52 |
| 3.5 Experimentelle und theoretische Korrelationen zwischen Haftfestigkeiten und oberflächenenergetischen Größen | 54 |
| 3.5.1 Zweiparametrische Grenzflächenenergiegleichungen | 54 |
| 3.6 Experimentelle und theoretische Korrelationen | 54 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.6.1 | Vierparametrische Grenzflächenenergiegleichungen | 57 |
| 3.7 | Diffusion | 60 |
| 3.7.1 | Modell auf Basis der Einstein-Gleichung | 60 |
| 3.7.2 | Reptationmodell | 62 |
| 3.7.3 | Platzwechselforgänge aufgrund von Molekülver Streckung und Relaxation | 70 |
| 3.7.4 | Diffusion an der Grenzfläche inkompatibler Systeme | 74 |
| 3.8 | Mechanische Adhäsion | 74 |
| 4 | Wärmeübertragung und Strömungsmechanik | 79 |
| 4.1 | Wärmeübertragung | 79 |
| 4.1.1 | Differentialgleichung | 79 |
| 4.1.2 | Rand- und Anfangsbedingungen | 79 |
| 4.1.3 | Schmelzen | 80 |
| 4.1.4 | Schmelzeschichtdickenberechnung mit Hilfe der effektiven Temperaturleitfähigkeit | 84 |
| 4.1.4.1 | Randbedingung: Konstante Wandtemperatur, halbunendlicher Raum | 84 |
| 4.1.4.2 | Randbedingung: Konstanter Wärmestrom, halbunendlicher Raum | 87 |
| 4.1.4.3 | Randbedingung: Konvektiver Wärmeübergang, halbunendlicher Raum | 88 |
| 4.1.4.4 | Randbedingung: Strahlungswärmeübergang, halb- unendlicher Raum | 89 |
| 4.1.4.5 | Randbedingung: Äußere Reibung, halbunendlicher Raum | 89 |
| 4.1.5 | Gekoppelte Systeme | 90 |
| 4.1.5.1 | Grenzfläche Festkörper/Festkörper | 90 |
| 4.1.5.2 | Grenzfläche Festkörper/strömendes gasförmiges oder flüssiges Medium | 92 |
| 4.1.6 | Wärmeübertragung an bewegten Oberflächen | 93 |
| 4.1.7 | Wärmeübertragung mit inneren Wärmequellen | 93 |
| 4.1.7.1 | Differentialgleichung | 93 |
| 4.1.7.2 | Wärmequellentherme | 93 |
| 4.1.7.3 | Lösungen der Differentialgleichung mit Wärmequellen- termen | 95 |
| 4.1.8 | Wärmeübertragung mit Wärmequellen, die künstlich in den zu erwärmenden Kunststoff eingebracht wurden | 97 |
| 4.1.8.1 | Stationäre punktförmige Wärmequellen | 97 |
| 4.1.8.2 | Stationäre linienförmige Wärmequelle | 97 |
| 4.2 | Strömungsmechanik | 99 |
| 4.2.1 | Quetschfließen zwischen zwei parallelen Kreisscheiben | 99 |
| 4.2.2 | Quetschfließen zwischen zwei parallelen Rechteckplatten | 101 |
| 4.3 | Stationäre Wärmeübertragung und Fließprozesse | 102 |
| 4.3.1 | Quetschfließen bei gleichzeitiger Wärmeleitung | 102 |
| 4.3.2 | Quetschfließen unter Berücksichtigung von Wärmeleitung und Dissipation im Schmelzefilm | 105 |

| | |
|---|-----|
| 5 Schweißen | 109 |
| 5.1 Schweißverfahren | 109 |
| 5.2 Wärmekontaktschweißverfahren | 110 |
| 5.2.1 Heizelementschiweißen | 110 |
| 5.2.1.1 Einordnung des Verfahrens und Anwendungsgebiete | 110 |
| 5.2.1.2 Normaltemperaturschiweißen | 110 |
| 5.2.1.3 Hochtemperaturschiweißen | 125 |
| 5.2.1.4 Schweißen gefüllter Materialien | 127 |
| 5.2.1.5 Schweißen von Materialien mit sehr niedriger Viskosität | 131 |
| 5.2.1.6 Einfluss von Feuchtigkeit auf die Schweißnahtfestigkeit | 131 |
| 5.2.1.7 Schweißen von Thermoplasten mit unterschiedlichen rheologischen und thermischen Eigenschaften | 131 |
| 5.2.1.8 Schweißen unterschiedlicher Thermoplaste | 135 |
| 5.2.1.9 Schweißen von vernetztem Polyethylen (PE-X) [40] | 136 |
| 5.2.1.10 Schweißnahtgefügestruktur bei teilkristallinen Thermoplasten | 138 |
| 5.2.1.11 Scale-up-Regeln | 139 |
| 5.2.1.12 Besonderheiten bei Rohrschweißungen | 143 |
| 5.2.1.13 Eigenspannungen | 144 |
| 5.2.2 Wärmekontaktschiweißen | 147 |
| 5.2.3 Wärmeimpulsschiweißen | 153 |
| 5.2.4 Sonderausführungen des Wärmekontakt- und des Wärmeimpulsverfahrens | 157 |
| 5.2.5 Heizkeilschiweißen | 159 |
| 5.2.5.1 Erwärmung mit metallischem Heizkeil | 159 |
| 5.2.5.2 Heißlufteerwärmung | 161 |
| 5.2.5.3 Nahtfestigkeit | 163 |
| 5.2.5.4 Kriterien für die Heizkeilschweißnaht | 165 |
| 5.3 Schweißen durch Bewegung | 166 |
| 5.3.1 Ultraschallschiweißen | 166 |
| 5.3.1.1 Einordnung des Verfahrens, Anwendungsgebiete und Funktionsschema | 166 |
| 5.3.1.2 Grundlagen | 168 |
| 5.3.1.3 Fügeflächengeometrien | 178 |
| 5.3.1.4 Schweißparameter und Nahtfestigkeit | 181 |
| 5.3.1.5 Schweißen von Materialkombinationen | 184 |
| 5.3.1.6 Ultraschallschiweißen von Folien | 187 |
| 5.3.1.7 Ultraschall-Punktschiweißen | 189 |
| 5.3.2 Vibrationsschiweißen | 190 |
| 5.3.2.1 Einordnung des Verfahrens | 190 |
| 5.3.2.2 Druck- und Weg-Zeit-Verlauf | 190 |
| 5.3.2.3 Feststoffreibphase | 192 |
| 5.3.2.4 Instationäre und stationäre Schmelzefilmbildung | 193 |
| 5.3.2.5 Abkühl-, Nachdruckphase | 196 |
| 5.3.2.6 Resümee | 196 |
| 5.3.2.7 Besonderheiten beim Vibrations- und Biaxialschiweißen | 196 |
| 5.3.2.8 Schweißparameter und Nahtfestigkeit | 200 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.3.2.9 | Fügen von verstärkten Materialien | 201 |
| 5.3.2.10 | Wassergehalt | 201 |
| 5.4 | Erwärmung im elektromagnetischen Feld | 202 |
| 5.4.1 | Einordnung der Verfahren | 202 |
| 5.4.2 | Hochfrequenzschweißen | 202 |
| 5.4.2.1 | Erwärmungsprinzip | 202 |
| 5.4.2.2 | Nahtgestaltung | 207 |
| 5.4.2.3 | Verwendbare Materialien | 208 |
| 5.4.3 | Mikrowellenschweißen | 208 |
| 5.4.4 | Induktionsschweißen | 210 |
| 5.5 | Erwärmen mit Hilfe von Strahlung | 212 |
| 5.5.1 | Strahlung | 212 |
| 5.5.2 | Laserstumpfschweißen | 217 |
| 5.5.2.1 | Verfahrensablauf und maschinentechnische Umsetzung des Laserstumpfschweißens | 217 |
| 5.5.2.2 | Temperaturentwicklung und Schmelzeschichtdicke in der Fügezone | 219 |
| 5.5.2.3 | Festigkeit | 223 |
| 5.5.3 | Durchstrahlschweißen | 225 |
| 5.5.3.1 | Verfahrensvarianten | 225 |
| 5.5.3.2 | Temperaturentwicklung und Schmelzeschichtdicke | 227 |
| 5.5.3.3 | Festigkeit | 229 |
| 5.5.4 | Heizstrahlerstumpfschweißen | 232 |
| 5.6 | Erwärmung durch Konvektion | 233 |
| 5.6.1 | Einordnung der Verfahren | 233 |
| 5.6.2 | Extrusionsschweißen | 233 |
| 5.6.2.1 | Verfahrensvarianten und Verfahrensablauf | 233 |
| 5.6.2.2 | Temperaturentwicklung und Schmelzschichtdicke in der Fügezone | 234 |
| 5.6.2.3 | Schweißparameter und Nahtfestigkeit | 239 |
| 5.6.3 | Warmgasschweißen | 242 |
| 5.7 | Erwärmung mit einem elektrischen Widerstandsdraht (Heizwendel- schweißen) | 244 |
| 5.8 | Prüfen von Schweißverbindungen | 245 |
| 5.8.1 | Prüfen von Rohmaterial und Halbzeug (einschließlich Formteile und Folie) | 245 |
| 5.8.2 | Prüfung der Nahtqualität geschweißter Halbzeuge und Formteile | 246 |
| 5.8.3 | Schweißnahtqualitätsprüfung von Folien und beschichteten Gewebe | 250 |
| 6 | Kleben | 261 |
| 6.1 | Einleitung | 261 |
| 6.2 | Arten der Klebstoffe | 261 |
| 6.2.1 | Chemisch abbindende Klebstoffe | 262 |
| 6.2.2 | Physikalisch abbindende Klebstoffe | 263 |
| 6.2.3 | Nichtabbindende Klebstoffe (Haftklebstoffe) | 264 |
| 6.3 | Klebeigenschaften von Kunststoffen | 264 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6.4 | Verfahrenstechnik | 268 |
| 6.4.1 | Vorbehandlung des Fügeteils | 268 |
| 6.4.1.1 | Reinigen | 268 |
| 6.4.1.2 | Aufrauen | 269 |
| 6.4.1.3 | Chemische Vorbehandlung | 269 |
| 6.4.1.4 | Thermische Vorbehandlung | 271 |
| 6.4.1.5 | Korona-Entladung | 272 |
| 6.4.1.6 | Traver-Verfahren | 274 |
| 6.4.1.7 | Niederdruckplasmabehandlung | 274 |
| 6.4.1.8 | Ionenätzen | 276 |
| 6.4.1.9 | Haftvermittler (Primer) | 276 |
| 6.4.2 | Klebstoffvorbereitung | 276 |
| 6.4.2.1 | Mischen | 276 |
| 6.4.2.2 | Einstellung der Viskosität | 280 |
| 6.4.3 | Klebstoffauftrag | 281 |
| 6.4.4 | Ablüften und Anlösen | 284 |
| 6.4.5 | Fügen und Fixieren | 287 |
| 6.4.6 | Abbinden des Klebstoffs | 289 |
| 6.4.6.1 | Chemische Abbindung | 290 |
| 6.4.6.2 | Physikalisches Abbinden | 292 |
| 6.5 | Klebnahtgestaltung | 293 |
| 6.6 | Klebnahtfestigkeit | 296 |
| 6.7 | Einfache Berechnungsansätze | 297 |
| 7 | Mechanische Verbindungen | 303 |
| 7.1 | Schnappverbindungen | 303 |
| 7.1.1 | Einleitung | 303 |
| 7.1.2 | Grundformen der Schnappverbindungen | 303 |
| 7.1.3 | Berechnungsgrundlagen | 304 |
| 7.1.3.1 | Fügekraft | 304 |
| 7.1.3.2 | Querkraft | 305 |
| 7.1.3.3 | Belastbarkeit der Schnappverbindungen | 315 |
| 7.1.4 | Stoffwerte | 315 |
| 7.2 | Pressverbindungen | 318 |
| 7.2.1 | Einleitung | 318 |
| 7.2.2 | Berechnungsgrundlagen | 318 |
| 7.2.2.1 | Drehmoment, Axialkraft, Fügedruck, Spannungen | 318 |
| 7.2.3 | Übermaß | 320 |
| 7.2.3.1 | Allgemeine Formulierung | 320 |
| 7.2.3.2 | Metallwelle/Kunststoffnabe | 321 |
| 7.2.3.3 | Kunststoffbuchse/Metallgehäuse | 322 |
| 7.2.4 | Stoffwerte | 324 |
| 7.3 | Schrauben | 325 |
| 7.3.1 | Einleitung | 325 |
| 7.3.2 | Verbindungen mit angeformten Gewinden | 325 |
| 7.3.2.1 | Feste Verbindungen | 325 |
| 7.3.2.2 | Bewegliche Verbindungen | 329 |

| | | |
|-----------------|--|------------|
| 7.3.2.3 | Spannungsverteilung innerhalb des vom Außengewinde überdeckten Innengewindes | 329 |
| 7.3.3 | Gewindeformende Schrauben | 330 |
| 7.3.3.1 | Allgemeines | 330 |
| 7.3.3.2 | Einschraubaugen (Tubus) | 330 |
| 7.3.3.3 | Berechnung von Kenngrößen der Verbindung | 331 |
| 7.3.4 | Verbindung mit metrischen Schrauben | 332 |
| 7.3.4.1 | Verbindung mit Schraube und Mutter | 332 |
| 7.3.4.2 | Verbindung mit im Kunststoff verankerten Gewindebolzen | 333 |
| 7.3.4.3 | Verbindung mit im Kunststoff verankerten Gewindeeinsätzen | 334 |
| 7.4 | Nieten von Kunststoffteilen | 335 |
| 7.4.1 | Einleitung | 335 |
| 7.4.2 | Ultraschallnieten | 335 |
| 7.4.2.1 | Prozess | 335 |
| 7.4.2.2 | Nietzapfengestaltung | 335 |
| 7.4.2.3 | Nietkopfformen | 337 |
| 7.4.2.4 | Werkstoffe | 337 |
| 7.4.3 | Kaltnieten | 337 |
| 7.4.4 | Warmnieten | 339 |
| 7.4.5 | Kombinationsnieten | 339 |
| 7.4.6 | Schnappnieten | 339 |
| Register | | 345 |