
Inhalt

| | |
|--|-----------|
| 1 Anwendung feststoffgeschmierter Wälzlager | 1 |
| 1.1 Einsatzgebiete und Anwendung von Festschmierstoffen | 2 |
| 1.1.1 Einsatz bei hohen Temperaturen | 2 |
| 1.1.2 Einsatz bei niedrigen Temperaturen | 3 |
| 1.1.3 Einsatz im Vakuum | 4 |
| 1.1.4 Einsatz bei energiereicher Strahlung | 6 |
| 1.1.5 Einsatz in aggressiven Medien | 7 |
| 1.1.6 Einsatz unter Reinraumbedingungen | 7 |
| 1.1.7 Einsatz bei besonderen Hygieneanforderungen | 7 |
| 1.1.8 Einsatz im Aussetzbetrieb | 9 |
| 1.1.9 Einsatz bei anomalen Belastungen | 10 |
| 1.2 Unterschiede bei der Anwendung von Festschmierstoffen und Fetten/Ölen | 11 |
| 1.3 Potenziale und Grenzen der Anwendung | 12 |
| 1.3.1 Potenziale der Feststoffschrägierung | 12 |
| 1.3.2 Grenzen der Feststoffschrägierung | 13 |
| 1.4 Zusammenfassung | 14 |
| Literatur | 14 |
| 2 Die Tribologie von Festschmierstoffen | 15 |
| 2.1 Tribologische Grundlagen | 15 |
| 2.1.1 Tribosysteme | 15 |
| 2.1.2 Reibungsarten | 16 |
| 2.1.3 Reibungszustände | 23 |
| 2.1.4 Verschleißarten | 24 |
| 2.1.5 Weitere tribologische Phänomene | 25 |
| 2.2 Festschmierstoffe und ihre tribologischen Eigenschaften | 26 |
| 2.2.1 Grundlagen | 26 |
| 2.2.2 Einteilung der Festschmierstoffe | 28 |
| 2.2.3 Polymere | 30 |
| 2.2.4 Schichtgitter-Festschmierstoffe | 35 |
| 2.2.5 Weichmetalle | 44 |

| | |
|---|------------|
| 2.3 Zusammenfassung | 51 |
| Literatur | 52 |
| 3. Theorie der Lebensdauer feststoffgeschmierter Gleit- und Wälzkontakte ... | 55 |
| 3.1 Die Mechanik feststoffgeschmierter Gleit- und Wälzkontakte | 55 |
| 3.1.1 Kontaktgeometrie und Kontaktkinematik | 56 |
| 3.1.2 Das Belastungsmodell – äußere und innere mechanische Lasten... | 58 |
| 3.1.3 Das Beanspruchungsmodell | 59 |
| 3.1.4 Das Kinematikmodell | 68 |
| 3.2 Die Tribologie feststoffgeschmierter Gleit- und Wälzkontakte | 77 |
| 3.2.1 Das Reibenergiemodell | 77 |
| 3.2.2 Das Verschleißmodell | 78 |
| 3.2.3 Das Lebensdauermodell | 81 |
| 3.3 Zusammenfassung | 88 |
| Literatur | 89 |
| 4 Lebensdauerprüfverfahren für feststoffgeschmierte | |
| Gleit- und Wälzkontakte | 91 |
| 4.1 Grundlagen | 91 |
| 4.1.1 Begriffe und Definitionen | 91 |
| 4.2 Lebensdauerprüfverfahren | 94 |
| 4.3 Lebensdauerprüfverfahren für feststoffgeschmierte Gleitkontakte | 95 |
| 4.3.1 Stift-Scheibe-Versuche | 96 |
| 4.3.2 Walze-Platte-Versuche | 96 |
| 4.4 Lebensdauerprüfverfahren für feststoffgeschmierte Wälzkontakte | 106 |
| 4.4.1 Modifizierter Vierkugelapparat | 107 |
| 4.4.2 Mechanik der Wälzbeanspruchung im Vierkugelapparat | 111 |
| 4.5 Auswertung der Lebensdauerprüfung | 121 |
| 4.5.1 Versagensindikatoren | 122 |
| 4.5.2 Optische Auswertung und Schäden | 123 |
| 4.5.3 Makroskopische Untersuchung | 123 |
| 4.5.4 Bestimmung des Verschleißvolumens | 124 |
| 4.5.5 Mikroskopische Untersuchungen | 125 |
| 4.6 Zusammenfassung | 126 |
| Literatur | 127 |
| 5 Wälzlager und Lagerkomponenten | 129 |
| 5.1 Aufbau und Normung von Wälzlagern | 130 |
| 5.1.1 Aufbau von Wälzlagern | 130 |
| 5.1.2 Bauformen von Wälzlagern | 130 |
| 5.1.3 Normung von Wälzlagern | 130 |
| 5.2 Wälzlagerkomponenten | 133 |
| 5.2.1 Wälzkörper | 133 |
| 5.2.2 Lagerringe | 133 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.2.3 | Werkstoffe für Wälzkörper und Lagerringe | 134 |
| 5.2.4 | Käfige | 135 |
| 5.3 | Wälz- und Gleitkontakte im Wälzlager | 137 |
| 5.3.1 | Lastübertragung | 139 |
| 5.3.2 | Wälzkörperführung | 141 |
| 5.3.3 | Käfigführung | 145 |
| 5.4 | Kopplungen und Freiheitsgrade im Wälzlager | 147 |
| 5.4.1 | Selbsthaltung | 147 |
| 5.4.2 | Zusammenhang Radialluft-Axialluft | 147 |
| 5.4.3 | Kippwinkel | 149 |
| 5.5 | Zusammenfassung | 151 |
| | Literatur | 151 |
| 6 | Mechanik und Thermodynamik feststoffgeschmierter Wälzlager | 153 |
| 6.1 | Statik und Elastomechanik von Wälzlagern | 153 |
| 6.1.1 | Druck- und Lastwinkel | 153 |
| 6.1.2 | Lastverteilung | 157 |
| 6.1.3 | Steifigkeit von Wälzlagern | 160 |
| 6.2 | Kinematik von Wälzlagern | 161 |
| 6.2.1 | Kinematik des idealen Wälzlagers | 161 |
| 6.2.2 | Anzahl Überrollungen | 163 |
| 6.2.3 | Umfangsgeschwindigkeit und Drehzahl des Käfigs | 165 |
| 6.3 | Dynamik feststoffgeschmierter Wälzlager | 165 |
| 6.3.1 | Änderung der Wälzkörper-Wirkdurchmesser in der Lastzone | 166 |
| 6.3.2 | Änderung der Kugelorbitalgeschwindigkeit in der Lastzone | 168 |
| 6.3.3 | Kugel-Käfig-Dynamik | 168 |
| 6.3.4 | Modellierung und Simulation der Kugel-Käfig-Dynamik | 170 |
| 6.3.5 | Reibenergiemodell für den Kugel-Käfig-Kontakt | 174 |
| 6.4 | Umgesetzte Reibenergie im Kugel-Käfig-Kontakt | 174 |
| 6.4.1 | Reibenergieansatz | 175 |
| 6.4.2 | Kontaktkräfte und Kugelposition | 176 |
| 6.5 | Thermodynamik feststoffgeschmierter Wälzlager | 178 |
| 6.5.1 | Verformungen beim Einbau des Lagers | 178 |
| 6.5.2 | Wärmedehnungen im Lager | 179 |
| 6.5.3 | Veränderungen der radialen Lagerluft | 183 |
| 6.6 | Zusammenfassung | 186 |
| | Literatur | 186 |
| 7 | Theorie der Gebrauchsdauer feststoffgeschmierter Wälzlager | 189 |
| 7.1 | Begründung des Reibenergiemodells als Grundlage einer Gebrauchsdauerprognose | 189 |
| 7.2 | Berechnung der Reibenergiebeanspruchung | 192 |
| 7.2.1 | Berechnung der Reibenergie für beschichtete Ringe | 192 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 7.2.2 | Berechnung der Reibenergie für beschichtete Wälzkörper | 192 |
| 7.2.3 | Berechnung der Summenreibenergie | 194 |
| 7.3 | Berechnung des nutzbaren Schmierstoffvolumens | 198 |
| 7.3.1 | Nutzbare Schmierstoffvolumen bei beschichteten Umlaufkugeln mit Kugeldrehachsenänderung | 199 |
| 7.3.2 | Nutzbare Schmierstoffvolumen bei beschichteten Umlaufkugeln ohne Kugeldrehachsenänderung | 200 |
| 7.3.3 | Nutzbare Schmierstoffvolumen bei beschichteten Antriebs- und Gegenkörpern und unbeschichteten Umlaufkugeln ohne Kugeldrehachsenänderung | 200 |
| 7.3.4 | Nutzbare Schmierstoffvolumen bei beschichteten Antriebs- und Gegenkörpern und unbeschichteten Umlaufkugeln mit Kugeldrehachsenänderung | 202 |
| 7.3.5 | Erkenntnisse zum nutzbaren Schmierstoffvolumen | 202 |
| 7.3.6 | Berechnung des nutzbaren Schmierstoffvolumens bei Transferschmierung | 203 |
| 7.4 | Ermittlung des Reibenergie-Verschleiß-Faktors | 206 |
| 7.5 | Berechnung der Gebrauchsduauer | 207 |
| 7.6 | Evaluation des Gebrauchsduauermodells | 208 |
| 7.6.1 | Evaluation des Gebrauchsduauermodells durch Variation der Geometrie der Antriebskugel | 208 |
| 7.6.2 | Evaluation des Gebrauchsduauermodells für die Ausgangskonfiguration | 210 |
| 7.6.3 | Evaluation des Gebrauchsduauermodells für eine Alternativkonfiguration | 211 |
| 7.6.4 | Evaluation des Gebrauchsduauermodells für eine andere Baugröße | 213 |
| 7.6.5 | Einführung eines temperaturabhängigen Reibenergie-Verschleiß-Faktors | 214 |
| 7.7 | Zusammenfassung | 216 |
| | Literatur | 216 |
| 8 | Lebensdauerprüfverfahren für feststoffgeschmierte Wälzlager | 217 |
| 8.1 | Lagerversuche und Prüfstände | 217 |
| 8.1.1 | Prinzip einer Lagerprüfung im Vier-Lager-Prüfstand | 217 |
| 8.1.2 | Aufbau eines Vier-Lager-Prüfstands | 219 |
| 8.1.3 | Messdatenerfassung und Regelung | 220 |
| 8.1.4 | Vierlagerprüfstände 6001 und 6205 | 222 |
| 8.1.5 | Vorbereitung und Inbetriebnahme des Vier-Lager-Prüfstands | 223 |
| 8.1.6 | Inbetriebnahme des Prüfstands und Versuchsdurchführung | 225 |
| 8.2 | Indikatoren für Erreichen der Lebensdauer | 226 |
| 8.2.1 | Summenreibmoment | 226 |
| 8.2.2 | Temperaturrentwicklung im Lager | 227 |
| 8.2.3 | Vibrationen und Geräuschentwicklung | 228 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 8.3 | Lagerschäden | 230 |
| 8.3.1 | Lagerschäden mit regulärer Schädigung | 230 |
| 8.3.2 | Lagerschäden mit irregulärer Schädigung | 231 |
| 8.3.3 | Käfigschäden | 233 |
| 8.3.4 | Tribologische Schadensanalyse der Versuchslager | 234 |
| 8.4 | Zusammenfassung | 239 |
| | Literatur | 239 |
| 9 | Lebensdauerauslegung und Gebrauchsdauer-bestimmung für feststoffgeschmierte Wälzlager | 241 |
| 9.1 | Hinweise für Anwender zur Lebensdauerauslegung für feststoffgeschmierte Wälzlager generell | 241 |
| 9.1.1 | Klären der Aufgabe und Ermitteln der Anforderungen | 242 |
| 9.1.2 | Ermittlung aussichtsreicher Lagerungs- und Schmierungskonzepte | 243 |
| 9.2 | Gebrauchsdauerprognose für Wälzlager mit MoS ₂ -Schmierung | 245 |
| 9.2.1 | Argumentationslinie des Gebrauchsdauermodells | 245 |
| 9.2.2 | Gültigkeitsbereich der Gebrauchsdauerprognose | 246 |
| 9.2.3 | Anleitung zur Auslegung MoS ₂ geschmierter Wälzlager | 247 |
| 9.3 | Hinweise für Lagerhersteller zur Optimierung der Wälzlagergeometrie im Hinblick auf ihren Einsatz mit Festschmierstoffen | 255 |
| 9.4 | Zusammenfassung | 257 |
| | Sachverzeichnis | 259 |