

Inhaltsverzeichnis

Content

0	Zeichen, Einheiten und Benennungen	III
1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	5
2.1	Hauptspindeln und Lagertechnologie für Werkzeugmaschinen	5
2.2	Tribologisches System Spindellager	7
2.2.1	Grundlagen des Spindellagers	7
2.2.2	Kinematik und Betriebsverhalten des Spindellagers	10
2.2.3	Reibung im Spindellager	12
2.2.4	Kontaktbedingungen, Schadensmechanismen und Ausfallursachen	13
2.3	Schmieringstechnologie für Werkzeugmaschinenhauptspindeln	16
2.3.1	Schmierungsanforderungen	16
2.3.2	Schmierstoffe	16
2.3.3	Schmierungsarten und -systeme	17
2.3.4	Einsatzgrenzen der Schmierungsprinzipien	20
2.4	PVD-Beschichtungen für Spindellager	22
2.4.1	Prozesstechnologie für Dünnschichten	22
2.4.2	Schadensmechanismen und -formen bei Beschichtungen	23
2.4.3	Herausforderungen der Lagerbeschichtung	24
3	Aufgabenstellung und Zielsetzung	27
4	Grundlagen der experimentellen Untersuchung	29
4.1	Messtechnischer Aufbau zur Untersuchung des Schmierungszustands	29
4.1.1	Identifikation des Schmierungszustands	29
4.1.2	Verfahren zur Untersuchung des Schmierungszustands	32
4.1.3	Auslegung und messtechnischer Aufbau	35
4.2	Prüfstandstechnische Aufbauten	37
4.2.1	Aufbau der Einzellagerprüfstände und des Tribometers	37
4.2.2	Aufbau der Prüfspindel	39
4.3	Vorstellung der verwendeten Schmierstoffe	40
4.4	Vorstellung der Prüfkörper und der Prüfstandsprogramme	41
4.4.1	Versuchsprogramm der Prüfspindel	41
4.4.2	Versuchsprogramm zur Analyse des Schmierungszustands	42
4.4.3	Versuchsprogramm der Grundlagenuntersuchungen an Triboscheiben	43
4.4.4	Versuchsprogramm der Spindellager	43
5	Belastungs- und Schmierungszustände von Spindellagern	47
5.1	Bestimmung des Belastungszustands von Spindellagern	47
5.1.1	Lagerlasten bei Schnittparametern im Bereich der Herstellerangaben	47
5.1.2	Lagerlasten bei Schnittparametern oberhalb der Herstellerangaben	48
5.1.3	Auswertung der Lagerlasten während der Zerspanung	49
5.1.4	Kinematische Bedingungen unter kombinierter Last	49
5.2	Analyse der Einflussparameter auf den Schmierungszustand	50
5.2.1	Plausibilität der ermittelten Messwerte	50

5.2.2	Verhalten bei varianten Betriebsbedingungen.....	51
5.2.3	Verhalten bei konstanten Betriebsbedingungen.....	53
5.2.4	Verhalten bei Mangelschmierung.....	54
5.3	Fazit des Betriebsverhaltens hinsichtlich des Schmierzustands	55
6	Tribologisches Verhalten beschichteter Spindellager bei EHD- und Mangelschmierung	57
6.1	Simulative Betrachtung zentraler Einflussfaktoren auf die Spannungsverläufe im Wälzkontakt	57
6.1.1	Eigenschaften des Beschichtungswerkstoffs und Schichtstärke	58
6.1.2	Bohrbewegung.....	60
6.1.3	Mikrokontaktgeometrie.....	61
6.1.4	Fazit der Simulationen	62
6.2	Hartstoffschichten zur Reibungs- und Verschleißreduktion	62
6.2.1	Amorphe Kohlenstoffbeschichtung a-C:H:W	64
6.2.2	Chromaluminiumnitrid-Beschichtung (Cr _{1-x} Al _x)N.....	65
6.2.3	Vergleich der Schichteigenschaften.....	65
6.2.4	Benetzungsverhalten von Schmierstoffen auf PVD-beschichteten Oberflächen	66
6.3	Experimentelle Qualifizierung am Analogiebauteil Triboscheibe	69
6.3.1	Grundlagenuntersuchungen an Triboscheiben	70
6.3.2	Fazit der Grundlagenuntersuchungen an Triboscheiben.....	74
6.4	Experimentelle Qualifizierung im Spindellager	75
6.4.1	Einfluss der Beschichtung auf das Lager	75
6.4.2	Schichtenanpassung und Untersuchungen der a-C:H:W _{DC} -Beschichtung..	77
6.4.3	Untersuchungen der a-C:H:W _{Puls} -Beschichtung	83
6.4.4	Untersuchungen der CrAlN-Beschichtung.....	87
6.4.5	Notlaufeigenschaften beschichteter Spindellager.....	90
6.4.6	Einsatz beschichteter Spindellager im Feld.....	92
6.5	Fazit der Untersuchungen.....	94
7	Vermeidung von Überschmierungszuständen mittels Direktschmierung	97
7.1	Berechnungsgrundlagen der Schmierstoffzufuhr	97
7.1.1	Berechnung eines Kapillarsystems mit stationärer Strömung.....	98
7.1.2	Berechnung eines Kapillarsystems mit instationärer Strömung.....	100
7.2	Aufbau und Untersuchung der Direktschmierungssysteme	102
7.2.1	Druckloses Direktschmierungssystem	102
7.2.2	Druckbeaufschlagtes Direktschmierungssystem	105
7.3	Aufbau und Untersuchung direktgeschmierter Werkzeugmaschinen spindeln	110
7.3.1	Einsatz eines drucklosen Direktschmierungssystems	110
7.3.2	Einsatz eines druckbeaufschlagten Direktschmierungssystems.....	114
7.3.3	Vergleich von Direktschmierung und Öl-Luft-Schmierung	116
7.4	Einfluss der Direktschmierung auf die Bearbeitungseigenschaften	117
7.5	Fazit der Untersuchungen.....	121
8	Zusammenfassung und Ausblick	123
9	Literatur	129
10	Anhang	143