
Inhaltsübersicht

Teil A Einführung

- 1 **Technik und Tribologie**
H. Czichos
- 2 **Tribologische Systeme**
H. Czichos

Teil B Grundlagen

- 3 **Tribologische Beanspruchung**
H. Czichos und E. Santner
- 4 **Reibung**
H. Czichos
- 5 **Verschleiß**
H. Czichos
- 6 **Schmierung**
K.-H. Habig und G. Knoll
- 7 **Tribokorrosion**
H. Czichos und J.-P. Celis
- 8 **Tribologische Mess- und Prüftechnik**
H. Czichos und H. Sturm

Teil C Tribomaterialien

- 9 **Tribotechnische Werkstoffe**
K.-H. Habig und A. Fischer
- 10 **Schmierstoffe**
K.-H. Habig und T. Mang

Teil D Tribotechnik

- 11 **Tribologie von Konstruktionselementen**
K.-H. Habig

-
- 12 Tribologie im Computer**
F. Talke
- 13 Tribologie in der Mikrotechnik**
H. Czichos
- 14 Tribologie in der Produktionstechnik**
E. Uhlmann
- 15 Tribologie von Werkzeugen**
P. Groche
- 16 Vakuumtribologie**
T. Gradt
- 17 Tieftemperaturtribologie**
T. Gradt
- 18 Hochtemperaturtribologie**
M. Woydt
- Teil E Methodik**
- 19 Methodik zur Bearbeitung von Reibungs- und Verschleißproblemen**
H. Czichos
- 20 Atlas von Verschleißerscheinungsbildern**
K.-H. Habig
- 21 Reibungs- und Verschleißdaten**
H. Czichos
- Teil F Zustandsüberwachung**
- 22 Machinery Diagnostics: Fundamentals and Tribosystem Applications**
R. S. Cowan and W. O. Winer

Inhaltsverzeichnis

Teil A Einführung

1	Technik und Tribologie	3
	H. Czichos	
1.1	Dimensionen der Technik	3
1.2	Definition der Tribologie	5
1.3	Aufgaben und Bedeutung der Tribologie	7
2	Tribologische Systeme	13
	H. Czichos	
2.1	Einführung in die systemtechnische Methodik	13
2.2	Funktion und Struktur tribologischer Systeme	15
2.3	Dimensionsbereiche tribologischer Systeme und Prozesse	17
	2.3.1 Nanotribologie	19
	2.3.2 Mikrotribologie	19
	2.3.3 Makrotribologie	21
2.4	Methodik zur Reibungs- und Verschleißanalyse	25

Teil B Grundlagen

3	Tribologische Beanspruchung	29
	H. Czichos und E. Santner	
3.1	Technische Oberflächen	29
	3.1.1 Aufbau technischer Oberflächen	29
	3.1.2 Mikrogeometrie technischer Oberflächen	33
3.2	Kontaktvorgänge	38
	3.2.1 Adhäsion	39
	3.2.2 Kontaktgeometrie und Kontaktmechanik	45
	3.2.3 Werkstoffanstrengung	56
3.3	Mikro/Nano-Kontakte	63

3.4	Kinematik	69
3.4.1	Bewegungsarten und Bewegungsablauf	70
3.4.2	Grenzflächendynamik	73
3.4.3	Kontakt-Eingriffsverhältnis	76
3.5	Thermische Vorgänge	79
3.5.1	Temperaturen in Tribokontakten	79
3.5.2	Blitztemperaturhypothesen	83
3.5.3	Modellrechnungen von Reibtemperaturen	86
4	Reibung	93
	H. Czichos	
4.1	Grundlagen und Übersicht	93
4.2	Reibungsmessgrößen	94
4.3	Reibungsmechanismen	96
4.3.1	Adhäsion	99
4.3.2	Deformation	105
4.3.3	Furchung	107
4.3.4	Energiedissipation	108
4.4	Reibungsarten	112
4.4.1	Gleitreibung	113
4.4.2	Rollreibung	115
4.4.3	Stick-slip-Vorgänge	118
4.5	Reibung und Wirkungsgrad	121
5	Verschleiß	127
	H. Czichos	
5.1	Grundlagen und Übersicht	127
5.2	Verschleißmessgrößen	127
5.3	Verschleißmechanismen	132
5.3.1	Oberflächenzerrüttung	133
5.3.2	Abrasion	137
5.3.3	Adhäsion	140
5.3.4	Tribochemische Reaktionen	142
5.3.5	Materialdissipation	144
5.4	Verschleißarten	146
5.4.1	Gleitverschleiß	147
5.4.2	Wälzverschleiß	150
5.4.3	Stoßverschleiß	151
5.4.4	Schwingungverschleiß	154
5.4.5	Furchungverschleiß	156
5.4.6	Strahlverschleiß	160
5.4.7	Erosion	162

5.5	Verschleiß und Zuverlässigkeit	167
5.6	Maßnahmen zur Verschleißminderung	178
6	Schmierung	181
	K.-H. Habig und G. Knoll	
6.1	Hydrodynamische Schmierungstheorie	182
6.2	Elastohydrodynamische Schmierung	186
6.2.1	Elastohydrodynamik Hertzscher Kontakte	187
6.2.2	Elastohydrodynamische Gleitlagerung	187
6.3	Grenzreibung	192
7	Tribokorrosion	201
	H. Czichos und J.-P. Celis	
7.1	Einfluss des Umgebungsmediums auf tribologische Systeme	201
7.2	Definition und Mechanismen der Korrosion	203
7.3	Korrosionsarten	204
7.4	Tribokorrosion bei Gleitbeanspruchung	205
7.5	Erosionskorrosion	210
8	Tribologische Mess- und Prüftechnik	215
	H. Czichos und H. Sturm	
8.1	Aufgaben und Kategorien der tribologischen Prüftechnik	215
8.2	Planung und Auswertung tribologischer Prüfungen	218
8.2.1	Versuchsplanung	218
8.2.2	Versuchsauswertung	222
8.3	Tribologische Laborprüftechnik	227
8.3.1	Prüfsysteme und Prüfmethodik	227
8.3.2	Charakterisierung tribologisch beanspruchter Oberflächen	232
8.3.3	Mechanismenorientierte Prüftechnik	238
8.3.4	Tribologische Ringversuche	243
8.4	Messtechnik der Mikro- und Nanoskala	247
8.4.1	Surface Force Apparatus (SFA)	248
8.4.2	Raster-Tunnel-Mikroskopie	249
8.4.3	Techniken im Rasterkraftmikroskop (SFM, AFM)	251
8.5	Tribologische Simulationsprüftechnik	262
8.5.1	Fallstudie Motortechnik: Tribosystem Kolbenring/Zylinderlaufbahn	265
8.6	Tribologische Betriebsprüftechnik	268
8.7	Ergebnisdarstellung tribologischer Prüfungen	272
8.7.1	Zeitabhängigkeit von Reibung und Verschleiß	272
8.7.2	Abhängigkeiten von Beanspruchungskollektiv und Systemstruktur	275
8.7.3	Tribologische Grenzbeanspruchungs-Diagramme	276
8.7.4	Tribomaps	278

Teil C Tribomaterialien

9	Tribotechnische Werkstoffe	283
	K.-H. Habig und A. Fischer	
9.1	Tribotechnische Werkstoffe im Maschinen- und Anlagenbau	286
9.2	Stähle	290
9.3	Eisen-Kohlenstoff-Gusswerkstoffe	311
9.4	Hartlegierungen und Hartverbundwerkstoffe	324
9.5	Nickel- und Kobaltlegierungen	330
9.6	Kupferlegierungen	335
9.7	Aluminiumlegierungen	342
9.8	Titanlegierungen	351
9.9	Hartmetalle	353
9.10	Ingenieurkeramische Werkstoffe	361
9.11	Oberflächenschutzschichten	383
9.12	Polymere Werkstoffe	400
10	Schmierstoffe	417
	K.-H. Habig und T. Mang	
10.1	Schmieröle	417
10.2	Schmierfette	426
10.3	Festschmierstoffe	428
10.4	Bioschmierstoffe	435
	10.4.1 Objektive Kriterien der besonderen Umweltverträglichkeit	437
	10.4.2 Basisöle und Additive für Bioschmierstoffe	437
	10.4.3 Tribologische Eigenschaften	438
	10.4.4 Einsatzbeispiel Hydrauliköle	439

Teil D Tribotechnik

11	Tribologie von Konstruktionselementen	443
	K.-H. Habig	
11.1	Lager	445
	11.1.1 Gleitlager	445
	11.1.2 Wälzlager	466
11.2	Zahnradpaarungen	480
11.3	Axiale Gleitringdichtungen	490
11.4	Kolbenring/Zylinderlaufbahn	498
11.5	Nocken/Nockenfolger	505

12	Tribologie im Computer	511
	F. Talke	
	12.1 Prinzipien der magnetischen Datenspeicherung	512
	12.2 Tribologie des Kopf-Band-Interfaces	515
	12.3 Tribologie des Kopf-Platten-Interfaces	519
	12.4 Nano Interface-Technologie in Computer-Festplattenlaufwerken	526
13	Tribologie in der Mikrotechnik	533
	H. Czichos	
	13.1 Funktion und Struktur von MEMS und MOEMS	533
	13.2 Herstellungstechnologien für MEMS	535
	13.3 Funktionalität und Skalierung von MEMS	537
	13.3.1 Mikrosensoren	537
	13.3.2 Mikroaktoren	538
	13.4 Tribotechnik von MEMS	540
	13.5 Tribometrie und Beanspruchungsanalyse von MEMS	543
	13.6 Tribomaterialien für MEMS	546
	13.7 Zuverlässigkeit von MEMS	551
14	Tribologie in der Produktionstechnik	555
	E. Uhlmann	
	14.1 Tribologische Systeme in Werkzeugmaschinen	556
	14.1.1 Das Tribosystem der Fertigung	557
	14.1.2 Tribologische Bewegungssysteme in Werkzeugmaschinen	558
	14.1.3 Koppel- und Fügestellen	559
	14.2 Führungen und Lagerungen in Werkzeugmaschinen	560
	14.3 Optimierung tribotechnischer Werkzeugmaschinenelemente	564
	14.4 Tribologie der Zerspanungstechnik	566
	14.4.1 Technologien zur Verschleißminimierung an Werkzeugen	567
	14.4.2 Technologien zur Verschleißminimierung am Bauteil	573
	14.5 Triboinduzierte Innovationen in der Produktionstechnik	577
	14.6 Verfügbarkeit von Produktionsanlagen und Instandhaltung	580
15	Tribologie von Werkzeugen	583
	P. Groche	
	15.1 Reibung	585
	15.2 Werkzeugverschleiß	589
	15.3 Tribologische Prüfverfahren	595
	15.4 Umformwerkzeuge	598
	15.5 Zerspanwerkzeuge	601

16	Vakuumtribologie	605
	T. Gradt	
	16.1 Tribosysteme in Vakuumumgebung	606
	16.2 Bedingungen und Erfordernisse der Vakuumumgebung	607
	16.3 Apparaturen für tribologische Untersuchungen im Vakuum	610
	16.4 Werkstoffe für Tribosysteme im Vakuum	613
	16.4.1 Beschichtungen, Festschmierstoffe	613
	16.5 Flüssige Schmierstoffe, Fette	616
	16.5.1 Polymere und Polymer-Komposite	617
17	Tiefemperaturtribologie	619
	T. Gradt	
	17.1 Tribosysteme in der Kryotechnik	620
	17.2 Tribologische Prüftechnik für Temperaturen unterhalb 120 K	621
	17.3 Werkstoffe für Tribosysteme bei tiefen Temperaturen	624
	17.3.1 Metallische Werkstoffe	625
	17.3.2 Polymere und Polymer-Komposite	627
	17.3.3 Festschmierstoffe	630
18	Hochtemperaturtribologie	633
	M. Woydt	
	18.1 Tribosysteme in der Hochtemperaturtechnik	633
	18.2 Tribologische Prüftechnik für Temperaturen oberhalb 400 °C	636
	18.3 Werkstoffe für Tribosysteme bei hohen Temperaturen	637
	18.3.1 Metallische Werkstoffe	638
	18.3.2 Ingenieurkeramiken	639
	18.3.3 Hartmetalle	641
	18.3.4 Triboaktive Werkstoffe	645
 Teil E Methodik		
19	Methodik zur Bearbeitung von Reibungs- und Verschleißproblemen ...	651
	H. Czichos	
	19.1 Tribotechnische Werkstoffauswahl	651
	19.1.1 Systemmethodik zur Werkstoffauswahl	652
	19.1.2 Fallstudie: wartungsfreies Feinwerktechnik-Gleitlager	654
	19.2 Tribotechnische Schadensanalyse	659
	19.2.1 Fallstudie: Schadensanalyse eines Kompressor-Dichtungssystems	659
	19.2.2 Methodik der tribologischen Schadensanalyse	661

20	Atlas von Verschleißerscheinungsbildern	665
	K.-H. Habig	
21	Reibungs- und Verschleißdaten	687
	H. Czichos	
	21.1 Methodische Grundlagen	688
	21.2 Tribologische Datenbank für Reibungs- und Verschleißdaten	691
Teil F Zustandsüberwachung		
22	Machinery Diagnostics: Fundamentals and Tribosystem Applications . .	697
	R. S. Cowan and W. O. Winer	
	22.1 Failure Prevention Strategies	698
	22.1.1 Root-Cause Analysis	698
	22.1.2 Statistical Control	699
	22.1.3 Reliability Engineering	700
	22.1.4 Asset Maintenance	702
	22.1.5 Knowledge-Based Systems	705
	22.2 Condition Monitoring	706
	22.2.1 Vibration Monitoring	708
	22.2.2 Oil Monitoring	710
	22.2.3 Corrosion Monitoring	713
	22.2.4 Thermal Monitoring	714
	22.2.5 Electrical Signature Analysis	716
	22.3 Nondestructive Evaluation	717
	22.3.1 Visual Inspection	717
	22.3.2 Liquid Penetrant and Magnetic Particle Inspection	718
	22.3.3 Eddy Current Inspection	718
	22.3.4 Radiography	719
	22.3.5 Acoustic Emission and Ultrasonic Detection Inspection	719
	22.4 Tribosystem Applications	721
	22.4.1 Bearings	721
	22.4.2 Gears	724
	22.4.3 Seals	726
	22.4.4 Lubricants in tribosystems	727
	22.4.5 Hydraulic Systems	728
	Literatur	731
	Sachverzeichnis	781