

Werkstoffe in der Tribotechnik

Reibung, Schmierung und
Verschleißbeständigkeit von
Werkstoffen und Bauteilen

Von Prof. Dr.-Ing. habil. Oltwig Pigors

Mit 314 Bildern und 189 Tabellen



Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie
Leipzig · Stuttgart

Inhaltsverzeichnis

1.	Einführung	13
2.	Probleme der Schädigung und der Zuverlässigkeit	15
2.1.	Systematik einer Schadensanalyse	15
2.2.	Untersuchungsverfahren und Prüfmethoden	21
3.	Grundprobleme von Reibung und Verschleiß	25
3.1.	Reibung	25
3.1.1.	Begriffsbestimmungen	26
3.1.2.	Reibung in technischen Systemen	31
3.1.3.	Analyse von Reibbeanspruchungen	36
3.1.4.	Reibungskenngrößen	36
3.2.	Verschleiß	37
3.2.1.	Begriffsbestimmungen	37
3.2.2.	Systemanalyse von Verschleißvorgängen	38
3.2.3.	Verschleißmechanismen	39
3.2.4.	Verschleißkenngrößen	45
3.2.5.	Zuverlässigkeitsbewertung von Reibpaarungen	47
4.	Schmierstoffe und einsatzverwandte Stoffe	50
4.1.	Schmieröle auf Mineralölbasis	51
4.2.	Synthetische Schmieröle	53
4.3.	Viskosität	57
4.3.1.	Allgemeine Einflußgrößen	58
4.3.2.	Viskosität-Temperatur-(VT)-Verhalten	58
4.3.3.	Viskosität-Schergefälle-(VS)-Verhalten	61
4.3.4.	Viskosität-Druck-(VP)-Verhalten	61
4.4.	Additive	64
4.5.	Festschmierstoffe	69
4.5.1.	Strukturwirksame Festschmierstoffe	69
4.5.2.	Reaktionswirksame Festschmierstoffe	71
4.5.3.	Physikalisch wirksame Festschmierstoffe	71
4.5.4.	Anwendungsformen von Festschmierstoffen	72
4.6.	Schmierfette	74
4.6.1.	Zusammensetzung von Schmierfetten und Arten	75
4.6.2.	Kenngrößen	76
4.7.	Schmierstoffbezeichnung nach DIN 51 502	79
4.8.	Schmierstoffauswahl und Schmierstoffprüfung	84
4.8.1.	Schmierstoffauswahl	84
4.8.2.	Schmierstoffprüfung	91

5.	Prüfung von Reibung, Schmierung und Verschleiß	93
5.1.	Grenzschichtbereiche von Reibpaarungen	93
5.2.	Laborverschleißprüfungen und Übertragbarkeit in die Praxis	97
5.3.	Ausgewählte Schmierstoff- sowie Reibungs- und Verschleißprüfmaschinen	104
5.3.1.	Schmierstoffprüfmaschinen	104
5.3.2.	Reibungs- und Verschleißprüfmaschinen	109
5.3.2.1.	Gleitverschleißprüfmaschinen für kontinuierliche Bewegung	109
5.3.2.2.	Gleitverschleißprüfmaschinen für oszillierende Bewegung	117
5.3.2.3.	Roll- und Wälzverschleißprüfmaschinen	118
5.3.3.	Spezielle Probleme der Verschleißprüfung	120
6.	Verschleißschäden und Systematik der Werkstoffauswahl	123
6.1.	Einflüsse auf Erscheinungsformen von Verschleißschäden	123
6.2.	Erscheinungsformen von Verschleißschäden an Gleit- und Wälzlagern und an Zahnrädern	124
6.3.	Erscheinungsformen von Verschleißschäden an der Paarung Rad/Schiene	126
6.4.	Verschleißvorgang an der Paarung Rad/Schiene	136
6.5.	Systematik für die Auswahl tribologisch beanspruchter Werkstoffe	143
6.5.1.	Systematik für die Werkstoffauswahl	144
6.5.2.	Fragen der Korrelation tribologischer und physikalischer Werkstoffeigenschaften	146
7.	Grundlagen der Eisenwerkstoffe	158
7.1.	Eisenwerkstoffübersicht	158
7.2.	Eisenlegierungen	164
7.2.1.	Beeinflussung der Existenzbereiche der allotropen Modifikationen des Eisens durch Legierungsbestandteile	164
7.2.2.	System Eisen-Kohlenstoff	165
7.3.	Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen	168
7.3.1.	Wärmebehandlung von Stahl	168
7.3.1.1.	Thermische Arbeitsverfahren (Auswahl)	168
7.3.1.2.	Chemisch-thermische Arbeitsverfahren (Auswahl)	177
7.3.2.	Wärmebehandlung von Gußeisen mit Lamellen- und Kugelgraphit	182
7.4.	Randschichtumschmelzen und Randschichtumschmelzlegieren	183
7.4.1.	Induktives Randschichtumschmelzen und -legieren	183
7.4.2.	Laser-Randschichtumschmelzen und -legieren	184
7.4.3.	Elektronenstrahl-Randschichtumschmelzen und -legieren	186
7.4.4.	Kombinierte Arbeitsverfahren	187
7.5.	Einflüsse der chemischen Zusammensetzung auf mechanische und tribologische Eigenschaften von Stählen	188
7.5.1.	Einfluß der Wärmebehandlung bei Festkörperverschleiß	188
7.5.2.	Einfluß üblicher Legierungselemente	189
7.5.3.	Einfluß von Mikrolegierungselementen	192
8.	Verschleißbeständige Eisenwerkstoffe	194
8.1.	Verschleißbeständige Stähle	195
8.1.1.	Standardisierte verschleißbeständige Stähle	196
8.1.2.	Vergütungsstähle	203
8.1.3.	Stähle für das Randschichthärten	204
8.1.4.	Nitrierstähle	205

8.1.5.	Einsatzstähle	210
8.1.6.	Werkzeugstähle	212
8.1.6.1.	Unlegierte Werkzeugstähle	212
8.1.6.2.	Legierte Werkzeugstähle	213
8.1.6.3.	Warmarbeitsstähle	214
8.1.7.	Sonstige Stahlgruppen	214
8.2.	Verschleißbeständige Eisen-Gußwerkstoffe	215
8.2.1.	Unlegierte Eisen-Gußwerkstoffe	218
8.2.2.	Stahlguß	218
8.2.3.	Hochchromlegiertes weißes Gußeisen	227
8.2.4.	Sondergußsorten und vergleichende Betrachtungen	231
9.	Hartstoffe (Ceramics), Hartstoffverbunde und Hartlegierungen	236
9.1.	Hartstoffe	236
9.1.1.	Nichtoxidische Keramik	238
9.1.2.	Oxidkeramik	241
9.1.3.	Ingenieurkeramik in der Tribotechnik	244
9.1.3.1.	Keramische Sandstrahldüsenwerkstoffe	244
9.1.3.2.	Keramische Bauteile bei Pumpen und Armaturen	245
9.1.3.3.	Keramik in der Kunststoffverarbeitung	245
9.1.3.4.	Schneidkeramik	247
9.1.3.5.	Biokeramik	251
9.1.3.6.	Keramik im Motoren- und Triebwerksbau	252
9.1.3.7.	Ausblick	254
9.2.	Hartmetalle	255
9.3.	Sinterhartstoffe auf Stahlbasis	258
9.4.	Cermets	259
9.5.	Hartlegierungen	260
10.	Polymere	266
10.1.	Polymerwerkstoffübersicht	266
10.1.1.	Struktur	266
10.1.2.	Zusatz- und Hilfsstoffe	270
10.2.	Thermoplaste	271
10.3.	Duroplaste	272
10.4.	Elastomere	273
10.5.	Polymere in der Tribotechnik	274
10.5.1.	Allgemeine Einflußparameter	274
10.5.1.1.	Verschleißvorgang	274
10.5.1.2.	Reibungsverhalten	275
10.5.1.3.	Einfluß der Rauheit des metallischen Gegenpartners auf den Verschleiß	279
10.5.1.4.	Einfluß der relativen Luftfeuchte	280
10.5.1.5.	Einfluß der Gleitgeschwindigkeit	281
10.5.1.6.	Einfluß der Pressung	283
10.5.2.	Verschleißbeständigkeit der Polymere	284
10.5.2.1.	Festkörperverschleiß	284
10.5.2.2.	Verschleißverhalten im Mischreibungsgebiet	290
10.5.2.3.	Abrasiv- und Strahlverschleiß	293
10.5.3.	Lagerwerkstoffe	294
10.5.4.	Ausblick	300

11.	Verschleißbeständige Randschichten durch Oberflächenbeschichtung	304
11.1.	Allgemeiner Überblick	304
11.2.	Oberflächenvorbehandlung und Schichthftung	308
12.	Elektrolytisch (galvanisch) und chemisch aufgebrahte Schichten	310
12.1.	Verfahrensübersicht	310
12.1.1.	Elektrolytisch (galvanisch) abgeschiedene Metallschichten	310
12.1.2.	Außenstromlos abgeschiedene Metallschichten	317
12.1.3.	Anodisch und chemisch erzeugte Konversionsschichten	318
12.1.4.	Dispersionsschichten	318
12.2.	Tribologisches Verhalten elektrolytisch und chemisch aufgebrahter Schichten	321
12.2.1.	Vergleichende Betrachtungen von Schichten	321
12.2.2.	Verschleißverhalten spezieller Schichten und Anwendungen	324
12.2.2.1.	Hartchromschichten	324
12.2.2.2.	Nickel- und Nickeldispersionsschichten	328
12.2.2.3.	Eisen- und Eisendispersionsschichten	333
13.	Thermische Spritzschichten	337
13.1.	Verfahrensübersicht	338
13.2.	Spritzwerkstoffe und tribologisches Verhalten	344
14.	Auftragschweißen	354
14.1.	Verfahrensübersicht	354
14.2.	Auftragschweißwerkstoffe und tribologisches Verhalten	356
14.2.1.	Verschleißbeständige Auftragschweißwerkstoffe	357
14.2.2.	Spezielle Anwendungen	382
15.	PVD- und CVD-Schichten	383
15.1.	PVD-Verfahren	383
15.1.1.	Vakuumaufdampfschichten	383
15.1.2.	Sputterschichten (Zerstäuben)	384
15.1.3.	Ionenplattierschichten	384
15.1.4.	Tribologisches Verhalten	386
15.2.	CVD-Verfahren	389
16.	Gleit- und Wälzverschleißverhalten metallischer Werkstoffe bei Misch- und Festkörperreibung	396
16.1.	Mischreibung	396
16.1.1.	Allgemeine Einflußgrößen	396
16.1.2.	Einfluß der Normalkraft und der Relativgeschwindigkeit	397
16.1.3.	Einfluß des Werkstoffs und seiner chemischen Zusammensetzung	401
16.1.4.	Gleitlagerwerkstoffe	408
16.1.4.1.	Anforderungen an Lagerwerkstoffe	410
16.1.4.2.	Weißmetalle auf Blei- und Zinngrundlage	412
16.1.4.3.	Legierungen auf Kupfergrundlage	413
16.1.4.4.	Legierungen auf Aluminiumgrundlage	413
16.1.4.5.	Sinterwerkstoffe	418
16.1.4.6.	Sonstiges	419

16.2.	Festkörperreibung	423
16.2.1.	Allgemeine Einflußgrößen	423
16.2.1.1.	Einfluß der Normalkraft	424
16.2.1.2.	Einfluß der Relativgeschwindigkeit	427
16.2.1.3.	Einfluß der umgebenden Medien	431
16.2.2.	Einfluß des Werkstoffs und seiner chemischen Zusammensetzung	438
16.2.2.1.	Einfluß des Gefüges, des Kohlenstoffgehalts und der Härte	438
16.2.2.2.	Einfluß weiterer Legierungselemente	445
16.2.2.3.	Grenzschichtbereich und Werkstoffbeanspruchung	450
16.2.2.4.	Verschleißverhalten von Werkstoffen	454
17.	Gleit- und Wälzverschleißverhalten metallischer Werkstoffe bei Wirkung abrasiver Stoffe	460
17.1.	Allgemeine Einflußgrößen	460
17.1.1.	Einfluß der abrasiven Stoffe	460
17.1.1.1.	Einteilung und Eigenschaften der abrasiven Stoffe	460
17.1.1.2.	Wirkung abrasiver Stoffe im tribologischen System	467
17.1.1.3.	Einfluß der Härte abrasiver Stoffe	469
17.1.1.4.	Einfluß der Abrasivkorngröße und -zusammensetzung	475
17.1.2.	Einfluß der Normalkraft	478
17.1.3.	Einfluß der Relativgeschwindigkeit	481
17.1.4.	Einfluß der umgebenden Medien	483
17.2.	Einfluß des Werkstoffs und seiner chemischen Zusammensetzung	484
17.2.1.	Einfluß des Gefüges, des Kohlenstoffgehalts und der Härte	485
17.2.2.	Einfluß weiterer Legierungselemente unter Berücksichtigung des Mahlverschleißes	493
17.2.3.	Grenzschichtbereich und Werkstoffbeanspruchung	497
17.2.4.	Verschleißverhalten von Werkstoffen	501
18.	Ausblick	512
	Literaturverzeichnis	513
	Sachwörterverzeichnis	543