

# 1. Trenje, trošenje i podmazivanje

<b>1. Trenje, trošenje i podmazivanje.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Tribologija.....</b>	<b>2</b>
1.1.1 Uvod.....	2
1.1.2 Tribološki sustav – struktura, funkcija i nazivlje.....	3
1.1.3 Tribološka opterećenja.....	7
<b>1.2 Trenje.....</b>	<b>9</b>
1.2.1 Osnove trenja.....	9
1.2.2 Mehanizmi i tehnička fizika trenja.....	12
1.2.3 Trenje i materijali.....	19
<b>1.3 Trošenje.....</b>	<b>21</b>
1.3.1 Osnove trošenja.....	21
1.3.2 Mehanizmi i tehnička fizika trošenja.....	21
1.3.3 Trošenje i materijali.....	23
<b>1.4 Podmazivanje i maziva.....</b>	<b>29</b>
1.4.1 Osnove podmazivanja.....	29
1.4.2 Mehanizmi i tehnička fizika podmazivanja.....	37
1.4.3 Maziva.....	47
1.4.4 Izbor maziva.....	57
<b>1.5 Oprema za podmazivanje.....</b>	<b>58</b>
1.5.1 Sustavi za podmazivanje.....	58
1.5.2 Oprema za podmazivanje uljima.....	59
1.5.3 Oprema za podmazivanje mastima.....	61
1.5.4 Podmazivanje motora s unutarnjim izgaranjem.....	65
<b>Dodatak.....</b>	<b>69</b>
<b>Literatura.....</b>	<b>86</b>

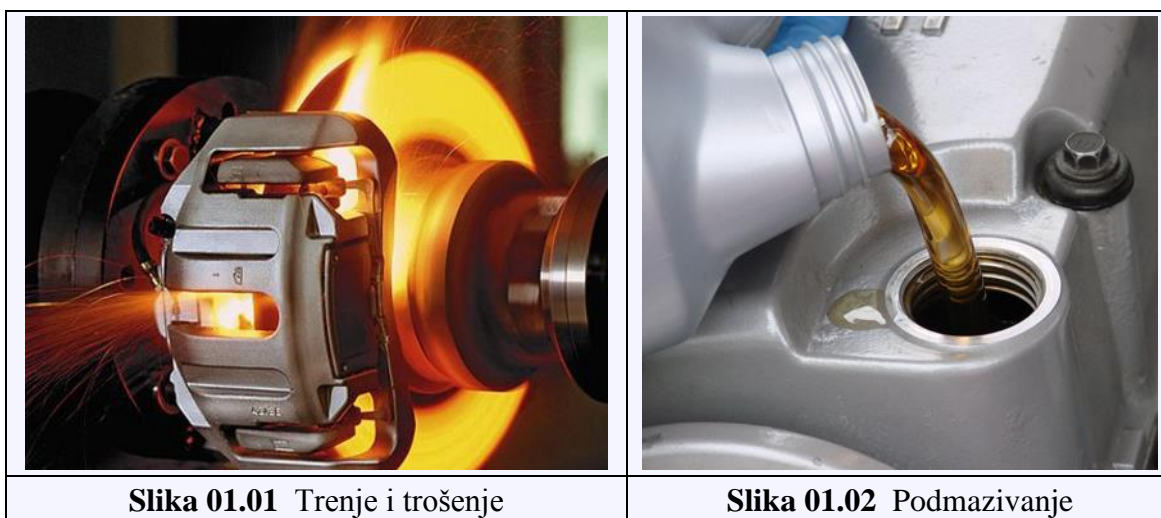
## Ishodi učenja:

1. Usvojena osnovna znanja iz trenja, trošenja i podmazivanja (*definicije, vrste i mehanizmi, fizika*).
2. Umjeti izračunati vučnu silu.
3. Usvojena osnovna znanja iz maziva (*vrste, izbor*).
4. Usvojena znanja iz opreme za podmazivanje.
5. Razumijevanje rada sustava za podmazivanje motora SUI.

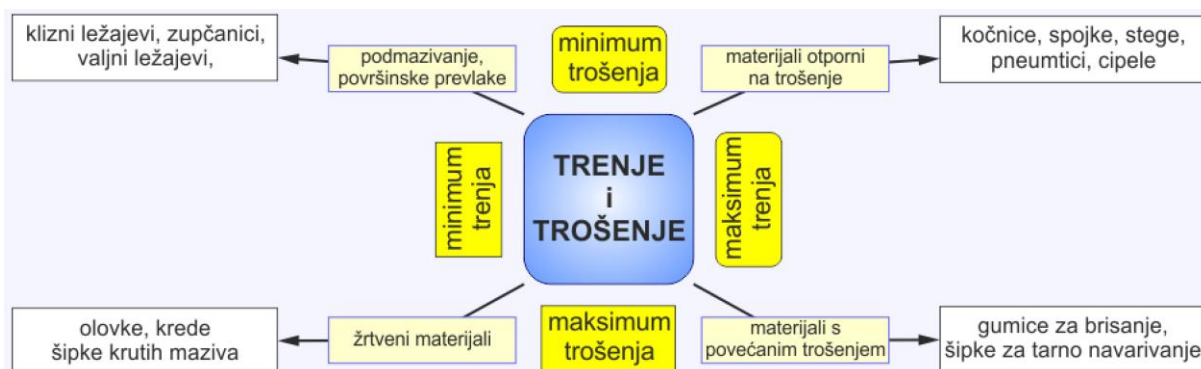
## 1.1 Tribologija

### 1.1.1 Uvod

**Tribologija** istražuje i opisuje (*znanost*) procese trenja i trošenja (*S-01.01*) te podmazivanja (*S-01.02*) i primjenjuje stečena znanja (*inženjerstvo*) u optimalizaciji triboloških sustava. Tribologija je složeno interdisciplinarno područje čije se istraživanje i opisivanje, zbog složenosti triboloških procesa, odvija uz brojne poteškoće – kaže se: „Bog je stvorio krute materijale, a Vrag njihove površine.“ [Ashby (2007), str. 228].



Kada se površine strojarskih elemenata dodirnu i počnu uzajamno gibati neizbježno se javlja trenje i trošenje. Ako bi se nekako eliminiralo trenje i trošenje značajno bi se smanjili utrošci energije potrebne za rad strojarskih sustava (*rad bi bio potreban samo za ubrzanje*) i značajno produljio vijek trajanja strojarskih elemenata (*kemijski agresivno djelovanje okoline*). Međutim, bez trenja se suvremena vozila ne bi mogla pokrenuti (*kontakt pneumatik/podloga*), a kada bi se nekako pokrenula ne bi se mogla zaustaviti. Bez trošenja ne bi mogli pisati olovkom po papiru niti kredom po ploči. Prema tome, funkcije ciljeva (*kvantitativni opisi ciljeva*) optimalizacije triboloških sustava su različiti, od minimuma do maksimuma trenja i/ili trošenja (*S-01.03*).



**Slika 01.03** Trenje i trošenje

Najčešće su sretani ciljevi tribologije u strojarskim sustavima:

1. poboljšanje performansi (*manji okretni moment potreban za start motora, kraći zaustavni put vozila*),
2. povećanje koeficijenta korisnog djelovanja (*manja potrošnja goriva*),
3. povećanje efektivnosti (*gotovost, pouzdanost, prilagodljivost*),
4. smanjivanje troškova održavanja (*rjeđa zamjena mazivog ulja*),
5. utvrđivanje i otklanjanje uzroka zastoja u radu (*sistemska analiza*),
6. produljenje vijeka trajanja.

U **T-01.01** prikazani su rezultati obrade ankete provedene na uzorku od 978 strojarskih inženjera.

**Tabela 01.01** Ciljevi provedbi triboloških mjera optimalizacije strojarskih sustava

Cilj	Frekvencija odgovora, %
1. produljenje vijeka trajanja	32
2. pogon bez održavanja	22
3. povećanje opterećenja i/ili broja okretaja	9
4. unapređenje proizvodnje	8
5. smanjenje potrošnje električne energije	7
6. smanjivanje curenja boljim brtvljenjem	6
7. smanjivanje šuma	5
8. primjena pri višim temperaturama	4
9. smanjenje vibracija	4
10. smanjivanje mase	2
11. ostalo	1

Za postizanje navedenih ciljeva potrebno je poboljšavati postojeće i razvijati nove:

1. tribološke materijale,
2. tribološke sustave,
3. sredstava za podmazivanje,
4. sustave za podmazivanje,
5. tribološke metode vrednovanja,

kao i:

6. normirati tribološke pokuse,
7. stalno prikupljati/uređivati/obrađivati/zapisivati relevantne tribološke informacije.

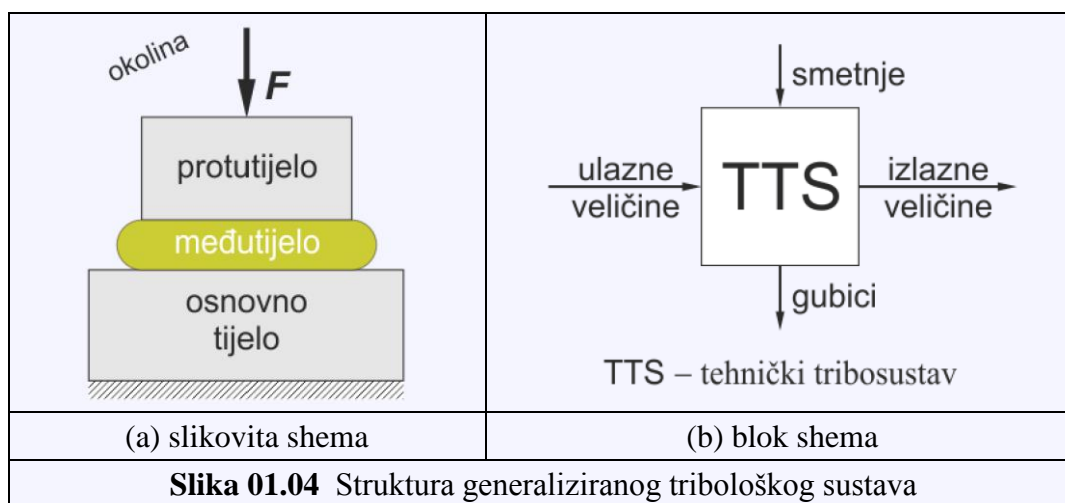
### 1.1.2 Tribološki sustav – struktura, funkcija i nazivlje

Osnovne komponente tribološkog sustava prikazane su slikovitom shemom na **S-01.04** (a). Sustav obuhvaća sljedeće komponente [Böge (2007), str. 459]:

1. **Osnovno tijelo** je važniji strojni element sa stajališta trošenja (*klizna staza vodilice, grabilica bagera*).
2. **Protutijelo** je kod zatvorenih sustava usvojeni strojni element (*rukavac vratila, klizna priзма vodilice*) a kod otvorenih stalno promjenljivo tijelo (*prešani komadi, stijene*).

#### 4 Elementi strojeva 2

3. **Međutijelo**, ili „treće tijelo“ nalazi se između osnovnog tijela i protutijela (*sredstvo za podmazivanje, abrazivno sredstvo*).



4. **Okolina** koja neposredno okružuje osnovno tijelo, protutijelo i međutijelo, najčešće zrak s određenim udjelima  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $H_2O$  i prašine. (*Supstancije koje sadrži okolina mogu reagirati s površinama tijela i međutijelom.*).

5. **Skup opterećenja** koja se opisuju tribološkim veličinama:

- **sila,  $F$** , (*vektor*) koja može biti promjenljiva po iznosu, pravcu i vremenu (*normalna sila,  $F_N$ , okomita je na površinu osnovnog tijela*),
- **relativna brzina,  $v$** , pri čemu gibanje može biti klizanje, kotrljanje, mirovanje (*statičko trenje*), udar, strujanje (*tekućine, plinovi*),
- **temperatura** koja utječe na viskozitet maziva i brzinu kemijskih reakcija,
- **vrijeme trajanja opterećenja,  $t_B$** , tijekom koga se povećava gubitak materijala i masa produkata kemijskih reakcija.

Tribološki sustav se može opisati i blok shemom **S-01.04** (b). Iz blok sheme slijedi osnovni zadatak triboloških sustava: transformacija raspoloživih ulaznih mehaničkih veličina u potrebne izlazne veličine, pri čemu rad sustava prate određene smetnje i gubici.

U **T-01.02** dati su primjeri tehničkih triboloških sustava grupiranih po funkciji [*Steinhilper 2 (2008), str. 6*], pri čemu se razlikuju tri vrste tehničkih triboloških sustava: energetske, masene i informacijske. Primjeri elemenata tehničkih triboloških sustava navedeni su u **T-01.03** [*Steinhilper 2 (2008), str. 7*].

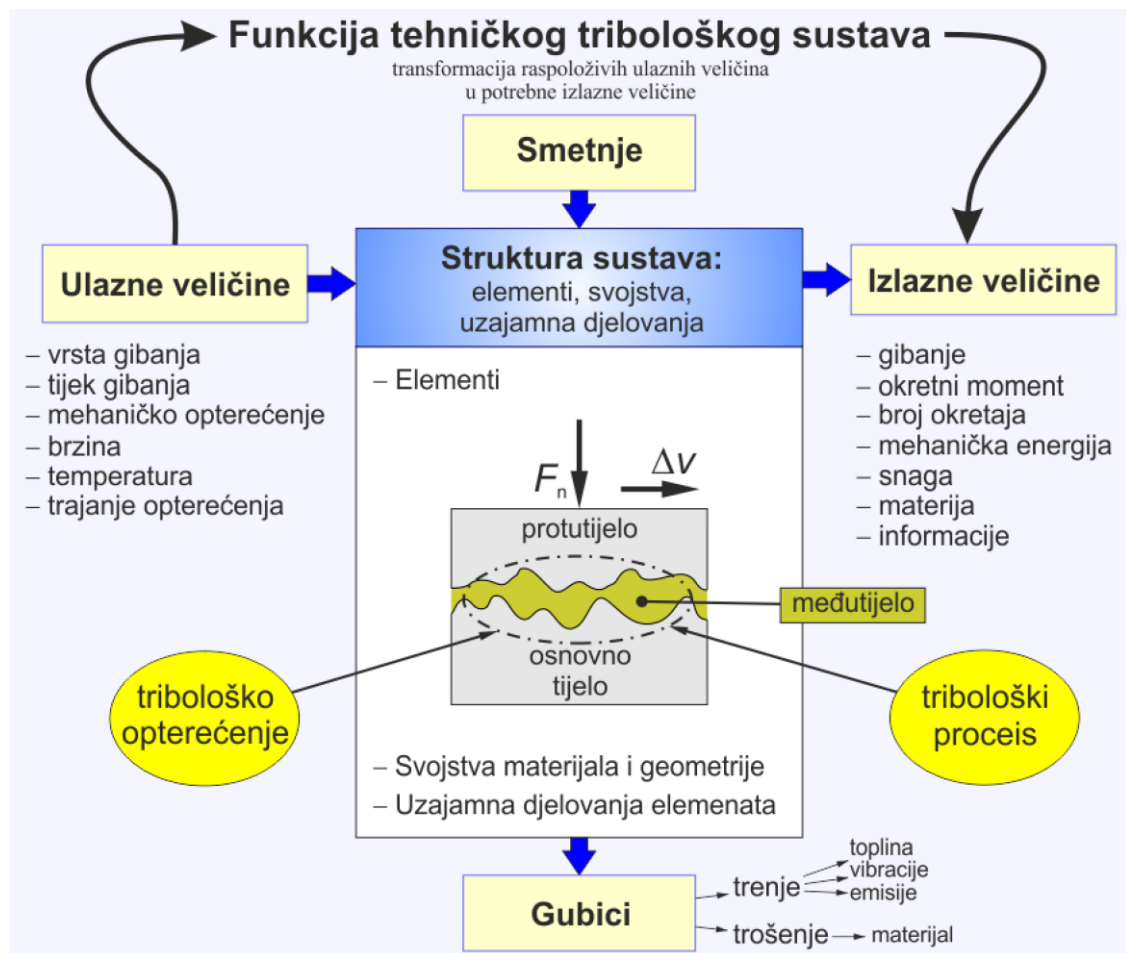
**Tabela 01.02** Ciljevi, elementi i vrste tehničkih triboloških sustava

Funkcija	Elementi	Vrsta sustava
Prijenos snage i vođenje dijelova	klizni ležajevi, valjni ležajevi, vodilice, dosjedi kotači/šine, pneumatici/cesta	energetski
Prijenos okretnog momenta	spojke, tarni spojevi glavina/vratilo	energetski
Promjena okretnog momenta	zupčani, remeni i lančani prijenosnici	energetski
Prijenos informacija	releji, klizni prsteni, bregasti mehanizmi	informacijski
Transport materijala	transportne trake, cjevovodi, klizni kanali	maseni
Odvajanje materijala	alati za tokarenje, glodanje, brušenje, bušenje, piljenje	maseni

**Tabela 01.03** Primjeri elemenata tehničkih triboloških sustava (TTS)

TTS	Tijelo			Okolina	Vrsta sustava
	osnovno	protutijelo	međutijelo		
Dosjed	rukavac	provrt	–	zrak	zatvoren
Klizni ležaj	vratilo	školjka ležaja	ulje	zrak	zatvoren
Klizna brtva	klizni prsten	protuprsten	tekućina ili plin	zrak	zatvoren
Zupčani pogon	manji zupčanik	veći zupčanik	ulje za mjenjače	zrak	zatvoren
Kotač/šina	kotač	šina	vlaga, prašina, mast	zrak	otvoren
Grabilica bagera / materijal	grabilica	materijal	–	zrak	otvoren
Nož za tokarenje	oštrica	komad	tekućina za rezanje	zrak	otvoren

Na **S-01.05** je detaljnije opisan generalizirani tribološki sustav [Steinhilper 2 (2008), str. 5].

**Slika 01.05** Detaljni prikaz generaliziranog tehničkog tribološkog sustava

U analizi triboloških sustava pored mehaničkih veličina moraju se uzeti u obzir i toplinske veličine. Naime, pri trenju i trošenju dolazi do preobražaja mehaničke energije u toplinu što dovodi do manje ili više značajnog porasta temperature dijelova sustava (*smanjuje se čvrstoća osnovnog tijela i protutijela te viskozitet tekućeg međutijela, a time i čvrstoća filma fluida*).

Relevantna svojstva/karakteristike elemenata tehničkih triboloških sustava sa stajališta tribologije navedeni su u **T-01.04** [Steinhilper 2 (2008), str. 8].

Tabela 01.04 Relevantna tribološka svojstva/karakteristike

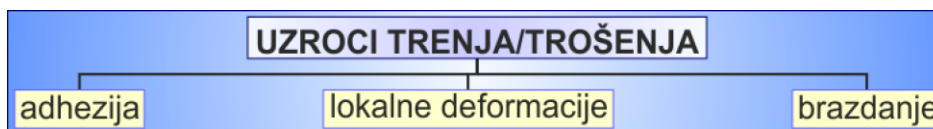
<b>1. Osnovno tijelo i protutijelo</b>	
1.1 Geometrijska svojstva	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• vanjske izmjere</li> <li>• odstupanja oblika i položaja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• valovitost</li> <li>• hrapavost površina</li> </ul>
1.2 Svojstva materijala	
1.2.1 Osnovni materijal	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• čvrstoća (<math>R_m</math>, <math>R_e</math>, <math>K_{IC}</math>, <math>R_d</math>)</li> <li>• tvrdoća (<math>HB</math> / <math>HRC</math> / <math>HV</math>)</li> <li>• deformacije (<math>E</math>, <math>\nu</math>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zaostala naprezanja</li> <li>• građa (<i>struktura + greške</i>)</li> <li>• kemijski sastav</li> </ul>
1.2.2 Površinski sloj	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• tvrdoća (<math>HB</math> / <math>HRC</math> / <math>HV</math>)</li> <li>• površinska energija</li> <li>• deformacije (<math>E</math>, <math>\nu</math>)</li> <li>• zaostala naprezanja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• debljina i građa površinskog sloja</li> <li>• površinska energija</li> <li>• građa (<i>struktura + greške</i>)</li> <li>• kemijski sastav</li> </ul>
1.3 Fizičke veličine	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• gustoća (<math>\rho</math>)</li> <li>• toplinska vodljivost (<math>\lambda</math>)</li> <li>• toplinska rastezljivost (<math>\alpha</math>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• talište (<math>g_m</math>)</li> <li>• specifična toplina (<math>c</math>)</li> <li>• higroskopnost</li> </ul>
<b>2. Međutijelo</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• agregatno stanje</li> <li>• za čvrsto agregatno stanje <ul style="list-style-type: none"> <li>- tvrdoća</li> <li>- raspodjela zrnitosti</li> <li>- oblici zrna</li> <li>- masa</li> <li>- broj zrna</li> <li>- broj komponenti</li> <li>- omjer komponenti u mješavini</li> <li>- kemijski sastav</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• za tekuće agregatno stanje <ul style="list-style-type: none"> <li>- viskozitet</li> <li>- temperatura</li> <li>- konzistentnost</li> <li>- sposobnost kvašenja</li> <li>- količina maziva</li> <li>- tlak</li> <li>- konstitucijski sastav</li> <li>- kemijski sastav</li> <li>- omjer komponenti u mješavini</li> </ul> </li> </ul>
<b>3. Okolina</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• agregatno stanje (<i>tekućina, plin</i>)</li> <li>• toplinska vodljivost (<math>\lambda</math>)</li> <li>• konstitucijski sastav</li> <li>• kemijski sastav</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• vlažnost plina</li> <li>• gustoća</li> <li>• tlak</li> <li>• temperatura</li> </ul>

**Trenje** – otpor uzajamnom gibanju tijela koja se dodiruju.

**Trošenje** – odvajanje materijala s površina tijela koja se dodiruju i uzajamno gibaju.

**Podmazivanje** – unos sredstava za podmazivanje između dodirnih površina tijela koja se uzajamno gibaju u cilju smanjenja trenja i trošenja.

Zajednički su uzroci trenja i trošenja:



- **Adhezija** – tijela prijanjaju na mjestima kontakata uslijed djelovanja međumolekulskih sila.
- **Lokalne deformacije** – na mjestima kontakata mijenjaju se geometrije površina tijela.
- **Brazdanje** – pri gibanju čvršće mikro neravnine razaraju mekše.

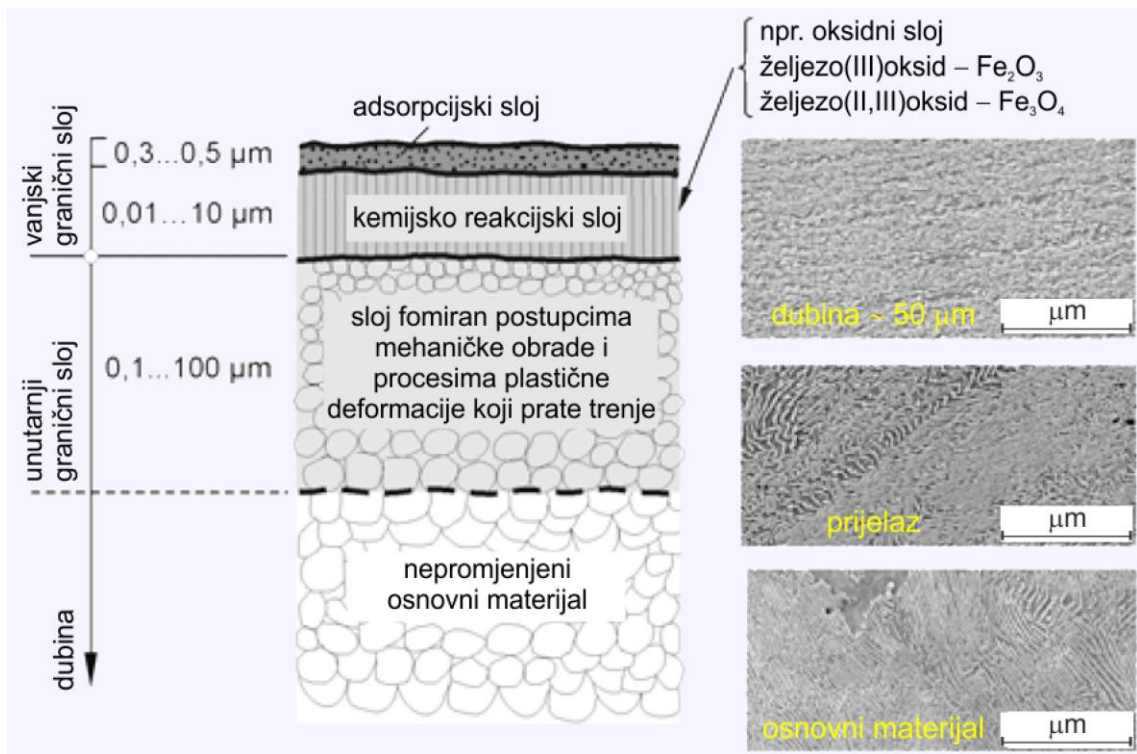
### 1.1.3 Tribološka opterećenja

Različite geometrije kontakta u tehničkim tribološkim sustavima prikazane su u **T-01.05** [Steinhilper 2 (2008), str. 10].

**Tabela 01.05** Geometrije kontakta u tehničkim tribološkim sustavima

Oblik kontakta		Osnovno tijelo	Protutijelo	Skica	Primjer primjene
konformni	ravnina	ravnina	ravnina		• ravne vodilice
		cilindrični provrt	valjak		• klizne vodilice, • cilindrični dosjedi • cilindrične vodilice
protuformni	linija	ravnina	valjak		• kotrljane vodilice
		valjak	valjak		• valjački stan, • kotrljajni ležaj
		zub	zub		• zupčanici
	točka	ravnina	kugla		• kuglaste vodilice
cilindrični provrt		kugla		• valjni ležaji	

Tijekom izrade u uporabe strojarskih elemenata, uslijed triboloških opterećenja, promjena temperature i kemijski agresivnog djelovanja okoline) dolazi do promjena u građi i kemijskom sastavu površinskog sloja strojarskih elemenata – **S-01.06** [Steinhilper 2 (2008), str. 9]. Promjene su izraženije ako su strojarski elementi u fazi izrade podvrgnuti toplinskoj obradi. Izmijenjeni se sloj u pravilu jasno razlikuje od osnovnog materijala.



Slika 01.06 Detaljni prikaz generaliziranog tehničkog tribološkog sustava

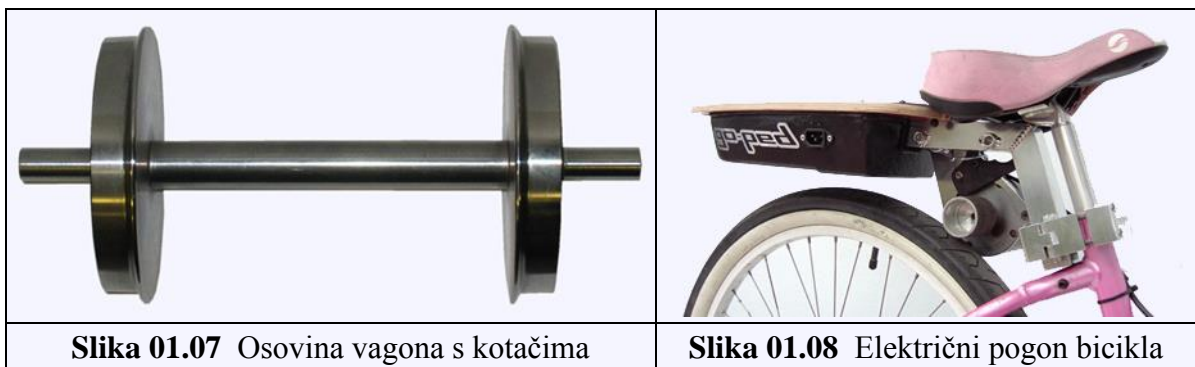


## 1.2 Trenje

### 1.2.1 Osnove trenja

**Trenje** (*otpor uzajamnom gibanju elemenata koji se dodiruju*) u pravilu prate štetni gubici energije. Međutim, kod kočnica trenje je korisno – njime se namjerno sustavu oduzima mehanička energija, koja se konvertira u termičku energiju.

Trenje ima ključnu ulogu u spojevima nepomičnih (*npr. tarni spojevi – S-01.07, vijčani spojevi*) i pomičnih (*npr. tarni prijenosnici – S-01.08, remeni prijenosnici*) strojarških elemenata.

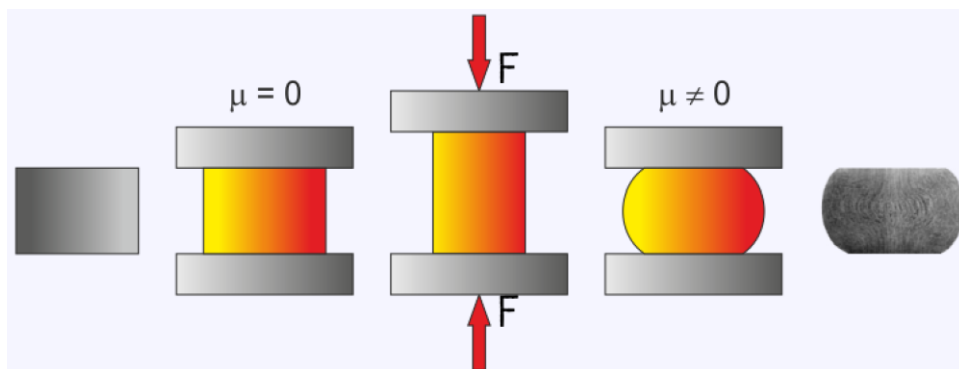


Sustavi sa poželjnim i nepoželjnim trenjem dati su u **T-01.06** [Steinhilper 2 (2008), str. 3].

**Tabela 01.06** Primjeri strojarških elemenata s poželjnim i nepoželjnim trenjem

Poželjno trenje	Nepoželjno trenje
<ul style="list-style-type: none"> <li>• kočnice, spojke</li> <li>• kotač/šine, pneumatici/ceste</li> <li>• tarni prijenosnici</li> <li>• remeni prijenosnici</li> <li>• vijčani spojevi</li> <li>• konična sjedišta, stege, uprešana sjedišta</li> <li>• amortizeri</li> <li>• transportne trake, transportirani materijal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• klizni ležaji, valjni ležaji, vodilice</li> <li>• brtve</li> <li>• zupčani i lančani pogoni</li> <li>• vijčani prijenos</li> <li>• klipni prsteni / cilindri</li> <li>• ventil / vodilica ventila, bregasti mehanizam</li> <li>• postupci obrade plastičnim deformiranjem</li> <li>• postupci obrade skidanjem strugotine</li> </ul>

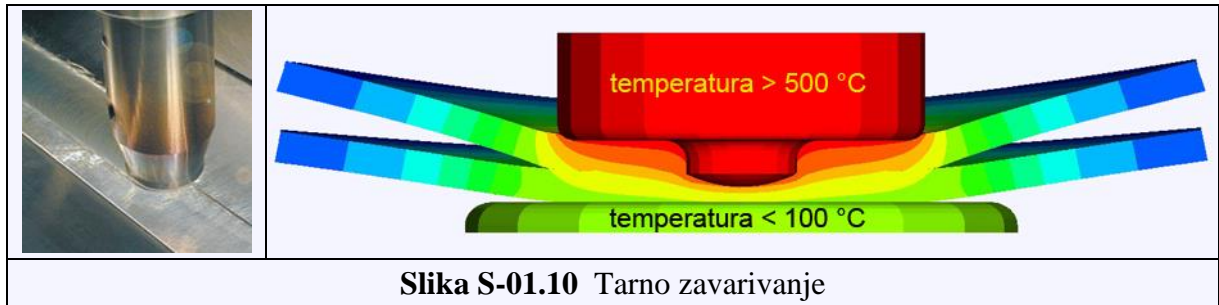
Trenje ima značajnu ulogu u oblikovanju materijala plastičnim deformiranjem – **S-01.09**.



**Slika 01.09** Deformiranje komada pri plastičnoj deformaciji

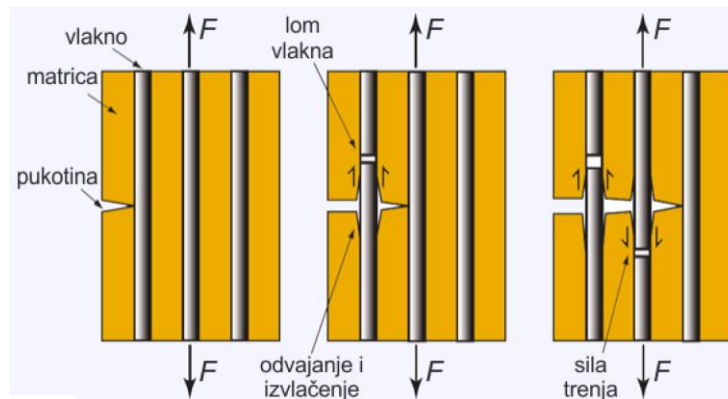
## 10 Elementi strojeva 2

Postupak suvremenog tarnog zavarivanja (*eng. friction stir welding*) temeljen je na toplini koja prati trenje – **S-01.10**.



**Slika S-01.10** Tarno zavarivanje

Uslijed statičkog trenja između površina ojačavajućih vlakana i nalijegajuće površine matrice otežano je širenje pukotine kompozita s vlaknima – **S-01.11**.



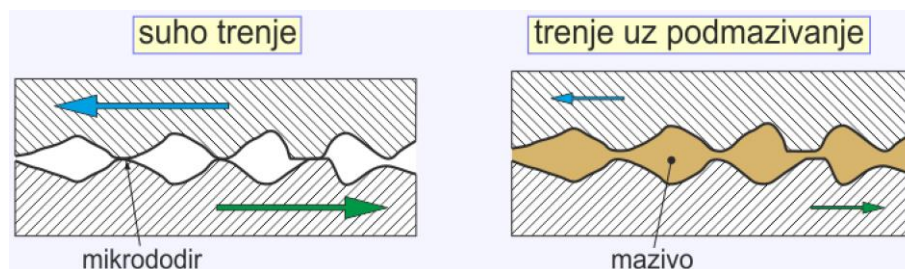
**Slika S-01.11** Širenje pukotine u kompozitu

Prema prirodi gibanja (*mirovanje/gibanje, klizanje/kotrljanje*) razlikuje se:



Statičko trenje (*neposredno prije pokretanja*) je veće od dinamičkog trenja (*u pokretu*), a trenje klizanja je veće od trenja kotrljanja.

Prema prisutnosti/odsutnosti sloja između uzajamno pokretnih dijelova razlikuju se dva granična slučaja – suho trenje (*neposredni kontakti površina*) i trenje uz podmazivanje (*trenje u tekućini*) – **S-01.12**.

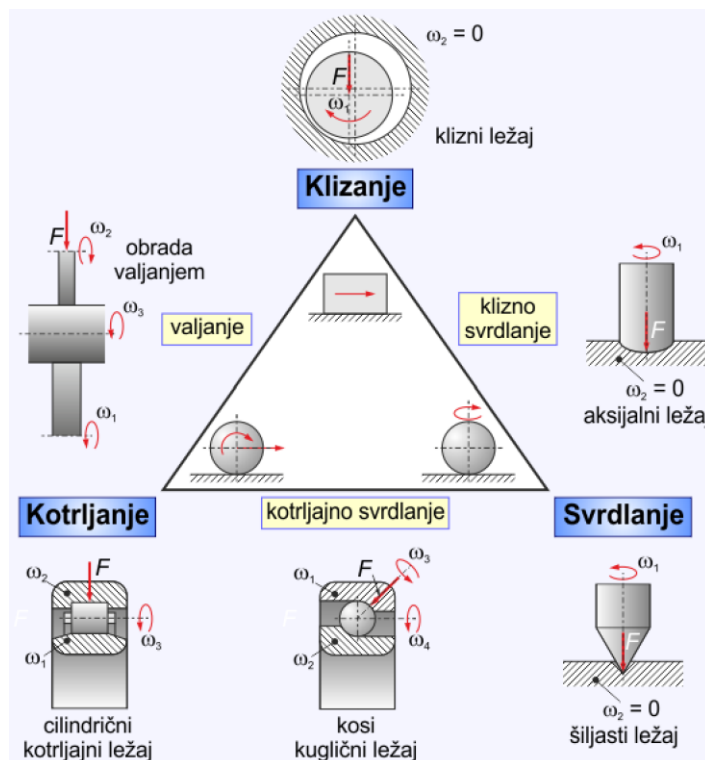


**Slika 01.12** Granične vrste trenja

**Suho trenje** – trenje uz neposredne kontakte površina uzajamno pokretnih elemenata (*sreće se samo izuzetno – u pravilu su između površina prisutni: vlaga, prašina i/ili sloj oksida*).

**Trenje uz podmazivanje** – trenje bez neposrednih kontakata površina uzajamno pokretnih elemenata. Kako bi se smanjilo trenje površine elemenata su odvojene slojem maziva (*suho trenje  $\Rightarrow$  unutarnje trenje maziva*).

Detaljnija je podjela trenja prema kinematikama relativnog gibanja osnovnog tijela / protutijela prikazana na **S-01.13** [Steinhilper 2 (2008), str. 16].



**Slika 01.13** Kinematike relativnog gibanja osnovnog tijela / protutijela

Na temelju agregatnih stanja osnovnog tijela / međutijela / protutijela razlikuju se:



- Trenje krutih tijela** – osnovno tijelo i protutijelo su u neposrednom kontaktu.
- Trenje graničnih slojeva** – osnovno tijelo i protutijelo su u kontaktu preko graničnih slojeva površina, koji su tijekom izrade tijela i procesa trenja izmijenili građe i kemijske sastave u odnosu na materijale tijela.
- Granično trenje** – između osnovnog tijela i protutijela nalazi se monomolekularni sloj maziva.
- Tekuće trenje** – međutijelo je tekućina u kojoj se odvija trenje (*unutarnje trenje tekućine*).
- Plinsko trenje** – međutijelo je plin i u njemu se odvija trenje (*unutarnje trenje plina*).

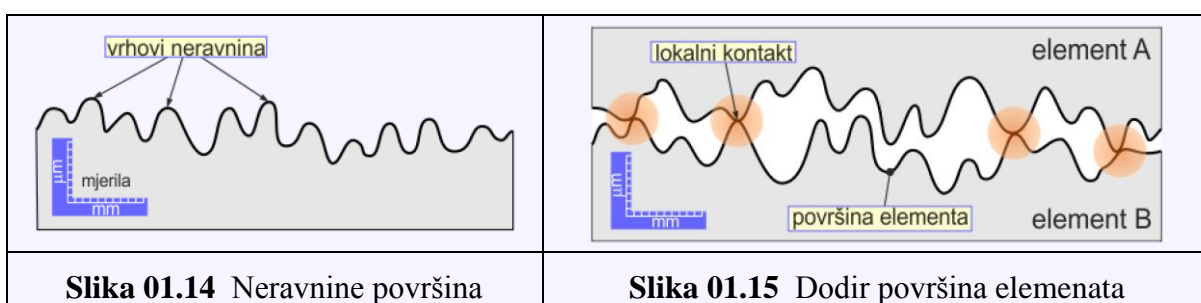
## 6. Mješovito trenje – kombinacija graničnog i tekućeg trenja.

## 1.2.2 Mehanizmi i tehnička fizika trenja

## Mehanizam trenja klizanja

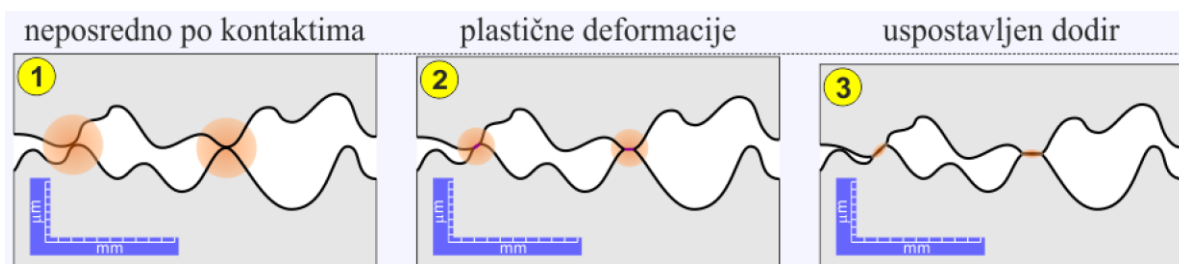
Za razumijevanje triboloških stanja i procesa bitno je imati u vidu mikro zbivanja koja se u makro pristupu gube iz vida. Pri tom je dovoljno ograničiti se na kvalitativnu mikro analizu jer je kvantitativna mikro analiza zbog prirode površina materijala iznimno složena.

Mikroanaliza otkriva neravnine površina elemenata (*S-01.14*) čiji se vrhovi prvi dodiruju pri uspostavljanju dodira elemenata A i B (*S-01.15*).



Na **S-01.15** crvenim poljima naglašena su područja lokalnih naprezanja materijala. Tijekom uspostavljanja dodira, s porastom broja lokalnih kontakata i veličina lokalnih dodirnih površina dolazi do smanjivanja lokalnih naprezanja (*opterećenje se raspoređuje na veće površine*).

Tijekom uspostavljanja ravnoteže dolazi do elastičnog potom i plastičnog deformiranja područja lokalnih dodira – elementi se uzajamno približavaju, raste broj dodira i stvarna dodirna površina – **S-01.16**,  $1 \Rightarrow 3$  (*veličinom crvenih polja semikvantitativno se opisuje veličina naprezanja*). Na mjestima prvih kontakata, uslijed brzih i velikih deformacija (*praćenih porastom termičke energije*), dolazi do taljenja da bi se po hlađenju formirali mikrozavari. Pri pokretanju tijela, za savladavanje statičkog trenja potrebno je prije svega raskinuti prethodno formirane mikrozavare.



**Slika 01.16** Uspostavljanje dodira elemenata

Ravnoteža se uspostavlja kada se naprezanje izjednači s granicom elastičnosti materijala:

$$\sigma = \frac{F_n}{A_s} = R_e \quad , \text{ N/mm}^2 \quad \text{F-01.01}$$

gdje je:  $F_n$  – sila normalna na površinu kontakta, N,  
 $A_s$  – stvarna površina dodira (*ukupna*),  $\text{mm}^2$ .

Za poznate vrijednosti  $F_n$  (poznato opterećenje) i  $R_e$  (poznat materijal) lako se izračunava stvarna površina dodira.

Na temelju mikroanalize dolazi se do zaključka:

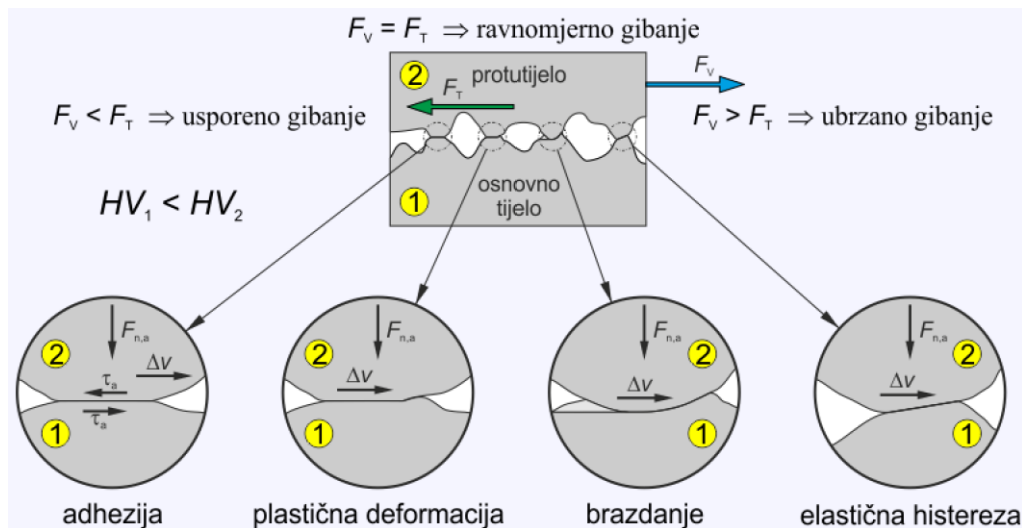
stvarne površine dodira  $\ll$  od nazivnih površina dodira

te se u makroanalizama stanja i procesa trenja veličine nazivnih površina mogu zanemariti.

U proces dinamičkog trenja (*trenje koje usporava gibanje*) uključene su četiri pojave:



Pojave koje prate dinamičko trenje su ilustrirane na **S-01.17**, pri čemu se koriste oznake:  $F_{n,a}$  za aktivnu silu koja djeluje između površina u kontaktu (*stvarna dodirna površina*) i  $\tau_a$  za smicajno naprezanje izazvano djelovanjem adhezije i vučne sile  $F_v$ .



**Slika 01.17** Pojave koje prate uzajamno gibanje elemenata [Steinhilper 2 (2008), str. 18]

**Elastična histereza** – jedan se dio energije za održavanje gibanja tijela uz trenje troši na elastične deformacije te gubi pri sporom povratu na prvobitne dimenzije (*raste temperatura*).

## Tehnička fizika trenja

Problemi trenja u tehničkoj fizici rješavaju se makropristupom s eksperimentalnim određivanjem koeficijenta trenja (**T-01.07**) za aktualne uvjete gibanja (**S-01.18** i **S-01.19**).

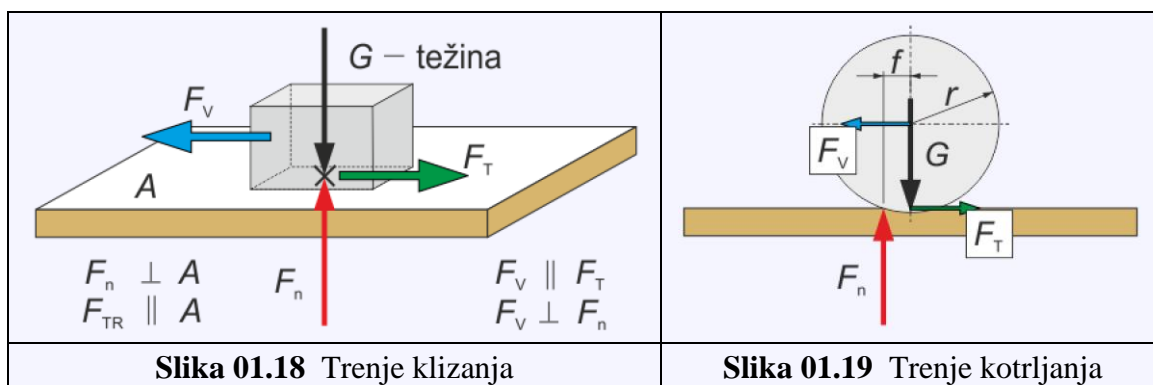


Tabela 01.07 Granične vrijednosti koeficijenta trenja [Steinhilper 2 (2008), str. 19]

Vrsta gibanja	Vrsta trenja	$\mu$ , 1
klizanje	suho	0,1 ÷ 1
	granično	0,1 ÷ 0,2
	mješovito	0,01 ÷ 0, 1
	tekućine	0,001 ÷ 0,01
	plina	0,0001
kotrljanje	(sa slojem masti)	0,001 ÷ 0,05

**Vučna sila** ( $F_V$  – vektor!) – sila kojom se vuče tijelo.

**Sila trenja** ( $F_T$  – vektor!) uvijek ima suprotan smjer od vučne sile te sprječava/usporava uzajamno gibanje tijela. Uobičajeni je opis ovisnosti sile trenja o normalnoj sili:

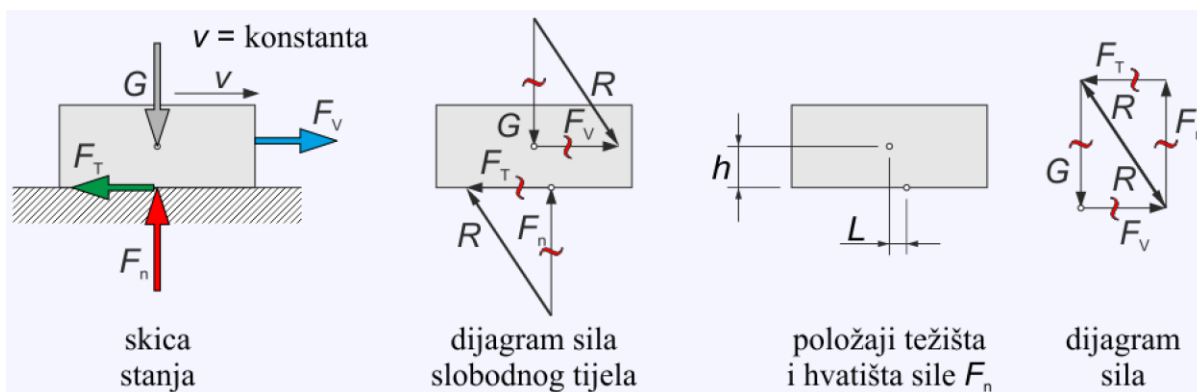
$$F_T = F_n \cdot \mu \quad , \quad N \quad \quad \quad \mathbf{F-01.02}$$

gdje je:  $F_n$  – normalna sila, N, ( $n$  u indeksu sile ukazuje na okomitost)

$\mu$  – koeficijent trenja (makropristup), 1.

Sila trenja koja se mora savladati za uzajamno pomicanje elemenata (gibanje ne započinje dok je vučna sila manja od sile trenja) razmjerna je normalnoj sili kojom jedan element djeluje na drugi, a neovisna je o nazivnoj površini (makrogeometrijskoj) dodira.

Težina, normalna sila, sila trenja i vučna sila su vektori te jednadžbu **F-01.02** treba primjenjivati oprezno, skladno postavkama vektorske algebre (**S-01.17**).



Slika 01.17 Analiza sila pri gibanju elementa na horizontalnoj ravnini

Kako bi se mogli usporediti parovi materijala u **T-01.08** navedeno je nekoliko primjera orijentacionih vrijednosti statičkih i dinamičkih koeficijenata trenja. Pri tome treba imati na umu:

- u odsutnosti vučne sile:  $\mu_{kl,st} = 0$
- neposredno prije pokretanja tijela:  $\mu_{kl,st} = \mu_{kl,st,Max}$  (**S-01.04**)

Što je veći  $\mu_{kl,st,Max}$  to će pri istoj vrijednosti  $F_n$  biti potrebna veća  $F_v$  za uzajamno pomicanje tijela. S druge strane,  $\mu_{kl,dn}$  za guma / suh beton je oko tri puta veća (0,7/0,25) od  $\mu_{kl,dn}$  za guma / vlažan beton te je logična velika razlika u zaustavnim putovima vozila.

**Tabela 01.08** Primjeri eksperimentalno određenih faktora trenja

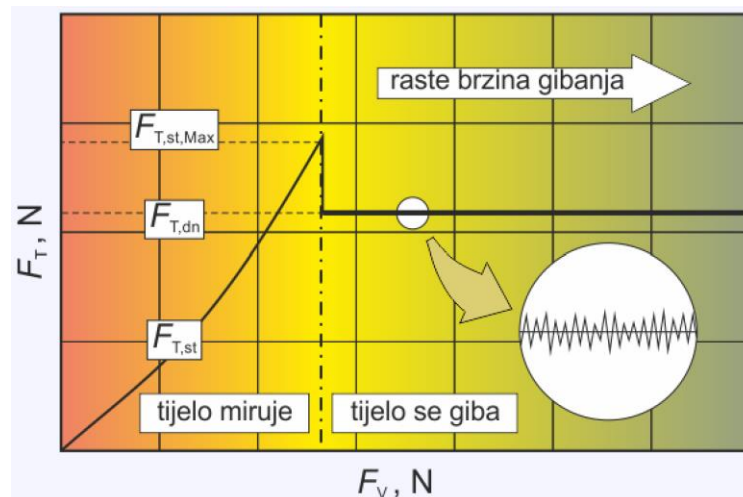
Materijali	$\mu_{kl,st,Max}$	$\mu_{kl,dn}$
drvo/drvo	0,5	0,3
čelik/čelik, bez maziva	0,15	0,09
čelik/čelik, s mazivom	0,03	0,03
guma/beton, suho	1,0	0,7
guma/beton, vlažno	0,30	0,25
čelik/teflon	0,04	0,04

gdje je:  $\mu_{kl,st}$  – faktor statičkog trenja klizanja, 1,

$\mu_{kl,dn}$  – faktor dinamičkog trenja klizanja, 1.

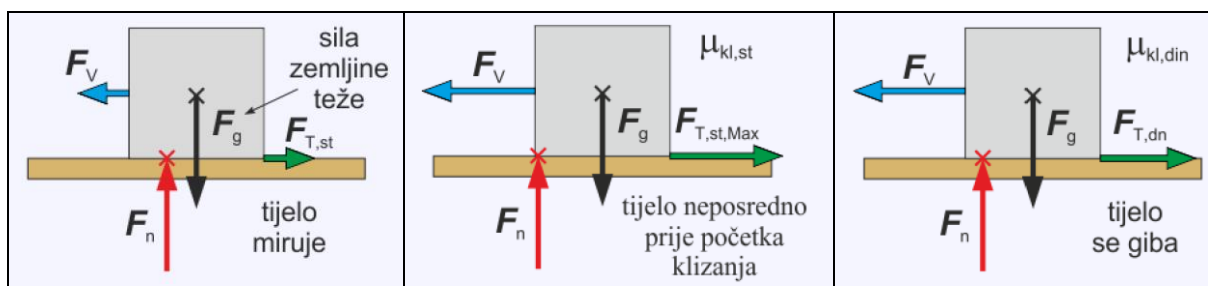
### Statičko i dinamičko trenje

Ovisnost sile statičkog/dinamičkog trenja klizanja o vučnoj sili prikazana je na **S-01.18**.



**Slika 01.18** Statičko i dinamičko trenje klizanja

Pri početnom rastu vučne sile rastu u tijelu naprezanja sve do momenta savladavanja sile statičkog trenja klizanja nakon čega se tijelo nadalje giba (*u manjoj ili većoj mjeri neravnomjerno*) uz savladavanje sile dinamičkog trenja klizanja – **S-01.19**.



Slika 01.18 Pokretanje tijela

Na početku gibanja tijela dolazi do ubrzanja (*povećanje brzine*) jer je  $F_V (= F_{T,st,Max}) > F_{T,dn}$ . Ubrzanje tijela određuje rezultanta:

$$F_V - F_T - F_d = 0 \quad (\text{vučna se sila „troši“ na savladavanje trenja i tromosti}) \quad F_d = F_V - F_T = m \cdot a$$

$$a = \frac{F_V - F_T}{m} \quad \mathbf{F-01.03}$$

Sila dinamičkog trenja klizanja ( $\mu_{kl,dn}$ ) ne ovisi o brzini gibanja tijela do oko 1,5 m/s, a pri daljem povećanju brzine gibanja sila dinamičkog trenja klizanja se smanjuje, što osobito dolazi do izražaja pri vrlo velikim brzinama.

Prema tome, treba ili smanjivati vučnu silu do prestanka ubrzanja tijela ( $F_V = F_{T,dn}$ ) ili će tijelo na dalje ubrzavati s konstantnim ubrzanjem (**F-01.03**) do oko 1,5 m/s te potom povećati ubrzanje zbog smanjivanja  $F_{T,kl,dn}$ . (*To neće ići unedogled – ili će „nestati“ prostora za pravocrtno gibanje u smjeru vučne sile ili će se „umiješati“ otpor zraka koji raste s porastom brzine tijela.*)

Nekoliko orijentacijskih vrijednosti statičkog i dinamičkog trenja klizanja parova materijala korištenih u izradi strojarskih elemenata dano je u **T-01.09** [Böge (2011), s. C24], dok je više točnijih vrijednosti navedeno u *Dodatku (TD-01.01)*.

Tabela 01.09 Primjeri eksperimentalno određenih koeficijenta trenja

Materijali	$\mu_{kl,st,Max}$		$\mu_{kl,dn}$	
	suho	maziva mast	suho	maziva mast
Čelik na čeliku	0,15	0,1	0,15	0,01
Čelik na željeznom lijevu ili CuSn leguri	0,19	0,1	0,18	0,01
Željezni lijev na željeznom lijevu		0,16		0,1
Drvo na drvu	0,5	0,16	0,3	0,08
Drvo na metalu	0,7	0,11	0,5	0,1
Remen od kože na željeznom lijevu		0,3		
Remen od gume na željeznom lijevu			0,4	
Remen od tekstila na željeznom lijevu			0,4	
Obloga kočnice na čeliku			0,5	0,4
Brtva od kože na metalu	0,6	0,2	0,2	0,12

Rad koje treba utrošiti na savladavanje trenja klizanja ovisi o putu  $L$  (*makropristup*):

$$W = F_V \cdot L \quad , \quad \mathbf{J} \quad \mathbf{F-01.04}$$



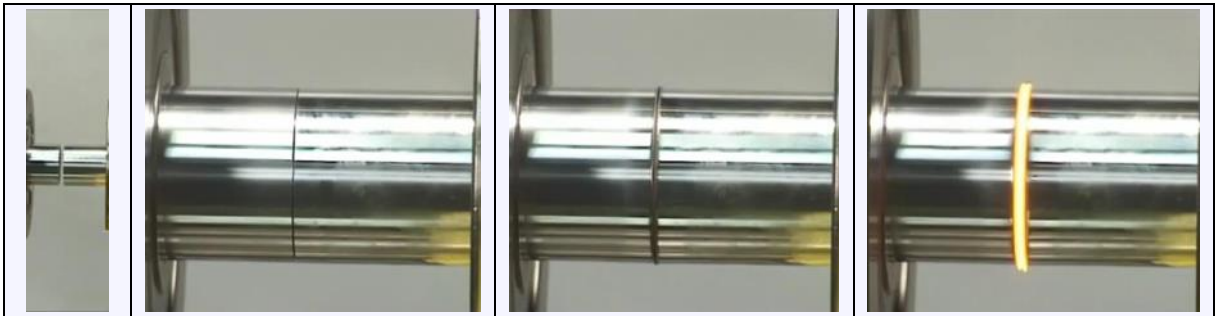
Kada je vrijeme ( $t$ ) potrebno za savladavanje puta ograničeno potrebno je angažirati snagu:

$$P = \frac{W}{t} \quad , W \quad \text{F-01-05}$$

Toplina koja se pri tom oslobodi jednaka je:

$$Q = P \cdot t \quad , J \quad \text{F-01-06}$$

Na **S-01.19** je prikazana primjena trenja u zavarivanju.



Slika 01.19 Zavarivanje trenjem

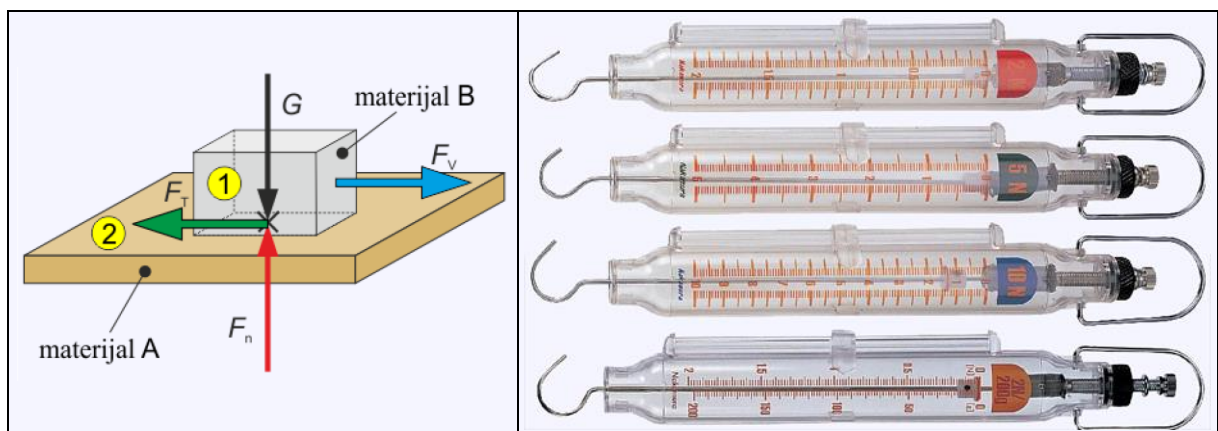
### Određivanje koeficijenta statičkog trenja

Na jednostavan je način moguće eksperimentalno odrediti koeficijent statičkog trenja s mjerenjem:

- vučne sile potrebne za pokretanje tijela i
- kuta nagiba strme ravnine pri kom se pokreće tijelo.

#### Mjerenje sile

Pomoću vage s oprugom odredi se težina dijela 1 (*S-01.20*). Dio 1, izrađen od materijala A, postavlja se na dio 2, izrađen od materijala B. Preko vage s oprugom povlači se dio 1 (*os opruge mora biti paralelna s ravninom klizanja*) i odredi pri kojoj se sili on pokreće.



Slika 01.20 Određivanje koeficijenta statičkog trenja klizanja s vagom

Imajući u vidu:

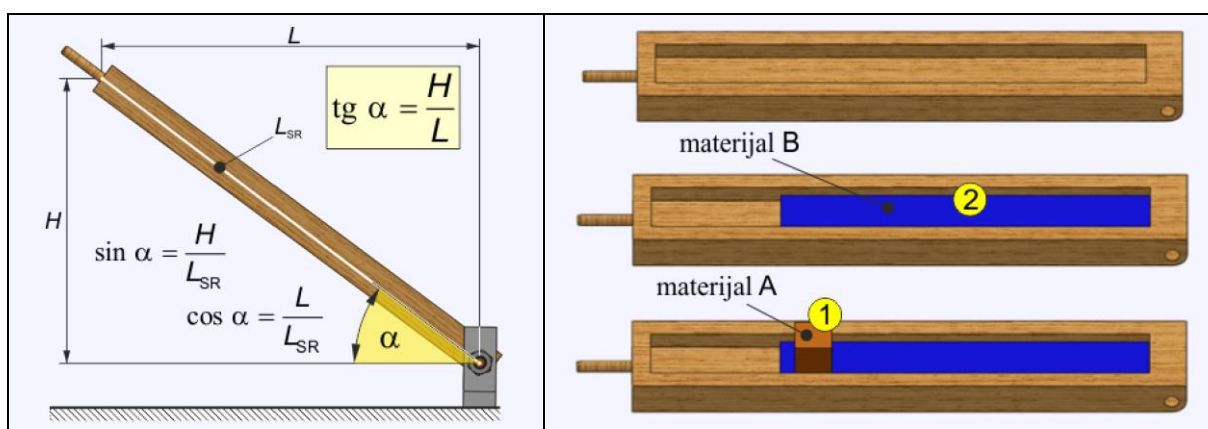
$$F_T = F_V \quad \text{i} \quad F_n = G$$

koeficijent statičkog trenja klizanja određuje se uz korištenje **F-01.02**:

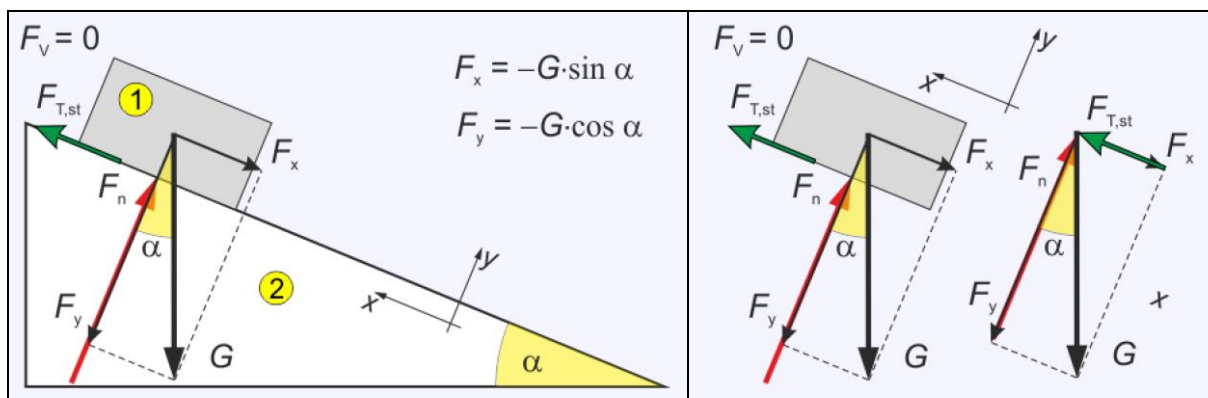
$$\mu_{kl,st,Max} = \frac{F_T}{F_n}$$

### Strma ravnina

Izmjeri se težina tijela 1 (*S-01.21-(a)*). Dio 2, izrađen od materijala B, postavi se u kanal strme ravnine pa se na njega postavi dio 1, izrađen od materijala A. Podiže se pomični kraj strme ravnine (povećava se kut strme ravnine u odnosu na horizontalno tlo) te izmjeri visina pri kojoj se Dio 1 pokrenu.



**Slika 01.21** Određivanje koeficijenta statičkog trenja klizanja – strma ravnina



**Slika 01.22** Određivanje  $\mu_{kl,st,Max}$  sa strmom ravinom – dijagrami sila

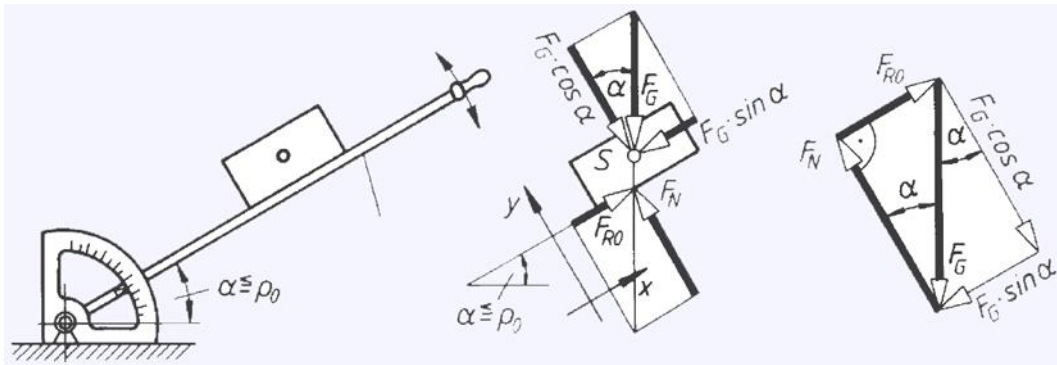
Sve vrijeme dok je  $\text{tg } \alpha < \mu_{kl,st,Max}$  tijelo stoji nepokretno na strmoj ravni. Kada se tijelo pokrene, odredi se posredno (mjere se dužine – *S-01.20*) te kako je (*S-01.21*):

$$F_{T,st} = -F_x = -(-G \cdot \sin \alpha) = G \cdot \sin \alpha \quad \text{i} \quad F_n = -F_y = -(-G \cdot \cos \alpha) = G \cdot \cos \alpha$$

koeficijent statičkog trenja klizanja određuje se uz korištenje **F-01.02**:

$$\mu_{kl,st,Max} = \frac{F_T}{F_n} = \frac{G \cdot \sin \alpha}{G \cdot \cos \alpha} = \text{tg } \alpha$$

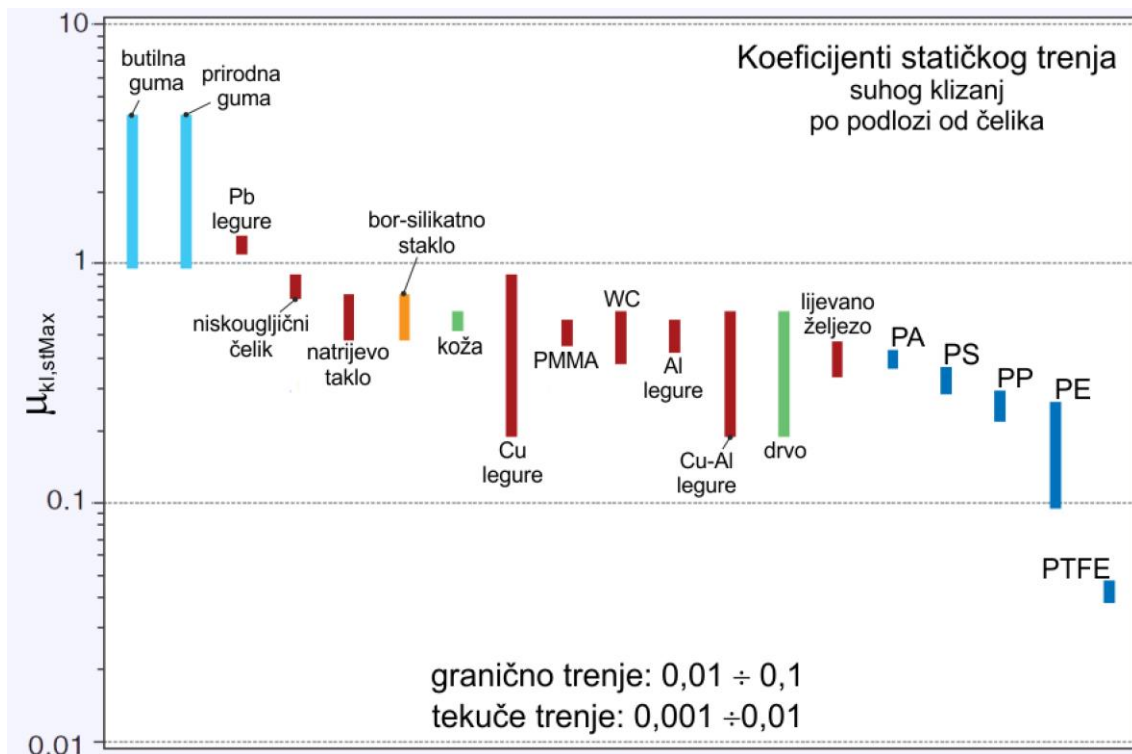
Koeficijenta statičkog trenja klizanja može se odrediti sa strmom ravninom i uz mjerenje kuta (*S-01.23*) umjesto dužina (*S-01.21*) [Böge (2011), s. C25].



**Slika 01.23** Određivanje  $\mu_{kl,st,Max}$  sa strmom ravninom uz mjerenje kuta

### 1.2.3 Trenje i materijali

Primjeri orijentacionih vrijednosti  $\alpha < \mu_{kl,st,Max}$ , pri suhom trenju klizanja po podlozi od čelika, prikazani su za različite materijale na **S-01.22** [Ashby (2007), s. 230].



**Slika 01.22** Koeficijenti trenja različitih materijale pri suhom klizanju (*bez podmazivanja*) po podlozi od čelika

Koeficijenti suhog statičkog trenja klizanja većine materijala su  $0,1 < \mu < 1$  (*S-01.22*). U slučaju guma  $\mu > 1$ , što znači da je za klizanje guma po podlozi od čelika potrebna veća vučna sila veća od normalne sile. S druge strane, u slučaju PTFE je  $\mu \sim 0,04$ , što znači da je za klizanje dovoljna vučna sila 25 puta manja od normalne.

Za često sretane parove materijala za izradu strojarskih elemenata u **T-01.10** dati su podaci za  $\mu_{kl, st, Max}$  ([www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d\\_778.html](http://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html)).

**Tabela 01.10** Koeficijenti statičkog trenja klizanja

Parovi materijala		Koeficijent statičkog trenja klizanja	
		čista suha površine	podmazane i zamašćene površine
aluminij	aluminij	1,05 ÷ 1,35	0,3
Al bronca	čelik	0,45	
aluminij	meki čelik	0,61	
materijali kočnica	lijevano željezo	0,4	
materijali kočnica	lijevano željezo ( <i>mokro</i> )	0,2	
mjed	čelik	0,35	0,19
cigla	drvo	0,6	
bronca	čelik		0,16
sinterirana bronca	čelik		0,13
kadmij	kadmij	0,5	0,05
kadmij	krom	0,41	0,34
lijevano željezo	lijevano željezo	1,1	
lijevano željezo	meki čelik	0,4	0,21
ugljik ( <i>tvrdi</i> )	ugljik	0,16	0,12 ÷ 0,14
ugljik	čelik	0,14	0,11 ÷ 0,14
krom	krom	0,41	0,34
Cu-Pb legure	čelik	0,22	
bakar	bakar	1	0,08
bakar	lijevano željezo	1,05	
bakar	meki čelik	0,53	
dijamant	dijamant	0,1	0,05 ÷ 0,1
dijamant	metal	0,1 ÷ 0,15	0,1
staklo	staklo	0,9 ÷ 1,0	0,1 ÷ 0,6,
staklo	Metal	0,5 ÷ 0,7	0,2 ÷ 0,3
staklo	nikal	0,78	0,56
grafit	čelik	0,1	0,1
grafit	grafit ( <i>u vakuumu</i> )	0,5 ÷ 0,8	
grafit	grafit	0,1	0,1
kudjeljno uže	drvena građa	0,5	
led	drvo	0,05	
željezo	željezo	1,0	0,15 ÷ 0,20
koža	Metal	0,4	0,2
koža	drvo	0,3 ÷ 0,4	
koža	čist metal	0,6	
vlakna koža	lijevano željezo	0,31	
vlakna koža	aluminij	0,30	
magnezij	magnezij	0,6	0,08
nikal	nikal	0,7 ÷ 1,1,	
najlon	najlon	0,15 ÷ 0,25	
papir	Lijeivano željezo	0,20	
fosforna bronca	čelik	0,35	
platina	platina	1,2	0,25
pleksiglas	pleksiglas	0,8	0,8
pleksiglas	čelik	0,4 ÷ 0,5	0,4 ÷ 0,5
polistiren	polistiren	0,5	0,5
polistiren	čelik	0,3 ÷ 0,35	0,3 ÷ 0,35

Politen ( <i>poliester</i> )	čelik	0,2	0,2
polistiren	polistiren	0,5	0,5
guma	karton	0,5 ÷ 0,8	
guma	suhi asfalt	0,9	
srebro	srebro	1,4	0,55
safir	safir	0,2	0,2
čelik	čelik	0,8	0,16
vlakna slame	lijevano željezo	0,26	
vlakna slame	aluminij	0,27	
katranizirana vlakna	lijevano željezo	0,15	
katranizirana vlakna	aluminij	0,18	
teflon	teflon	0,04	0,04
teflon	čelik	0,05 ÷ 0,2	
WC	čelik	0,4 ÷ 0,6	0,1 ÷ 0,2
WC	WC	0,2 ÷ 0,25	0,12
WC	bakar	0,35	
WC	željezo	0,8	
pneumatik ( <i>suh</i> )	cesta ( <i>suha</i> )	1	
pneumatik ( <i>mokar</i> )	cesta ( <i>mokra</i> )	0,2	
drvo	čisto drvo	0,25 ÷ 0,5	
drvo	mokro drvo	0,2	
drvo	čist metaletal	0,2 ÷ 0,6	
drvo	mokar metal	0,2	
drvo	beton	0,62	
drvo	cigla	0,6	
cink	lijevano željezo	0,85	
cink	cink	0,6	0,04

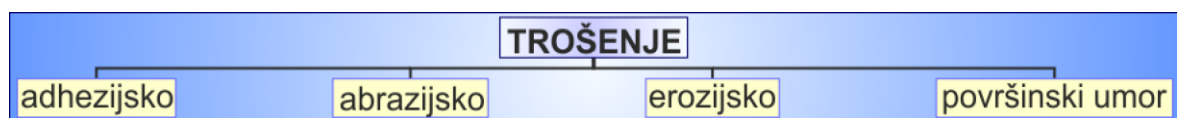
## 1.3 Trošenje

### 1.3.1 Osnove trošenja

**Trošenje** – površinski gubici materijala tijela koja se uzajamno gibaju. Brzinu trošenja povećava: (a) mehaničko djelovanje prisutnih stranih tijela i (b) kemijski agresivno djelovanje okoline. (*skidanje strugotine i trošenje alata*)

Posljedice su trošenja promjene geometrije površina uzajamno pokretnih dijelova. Istraživanja su pokazala kako je preko 50 % zastoja strojarskih sustava izazvano oštećenjima strojarskih pokretnih sklopova trošenjem.

Prema prirodi, razlikuju se četiri vrste trošenja:

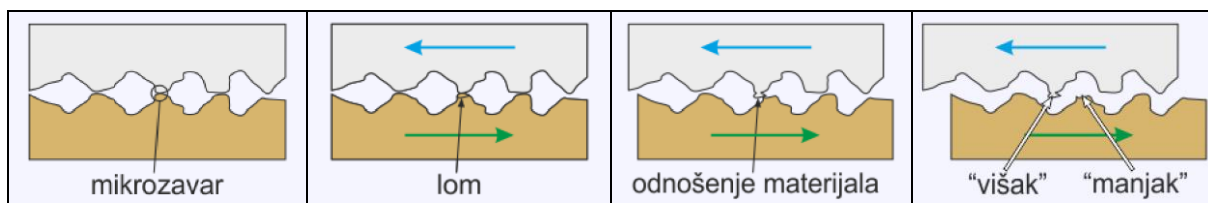


Sve vrste trošenja materijala, u većoj ili manjoj mjeri, ubrzava korozija.

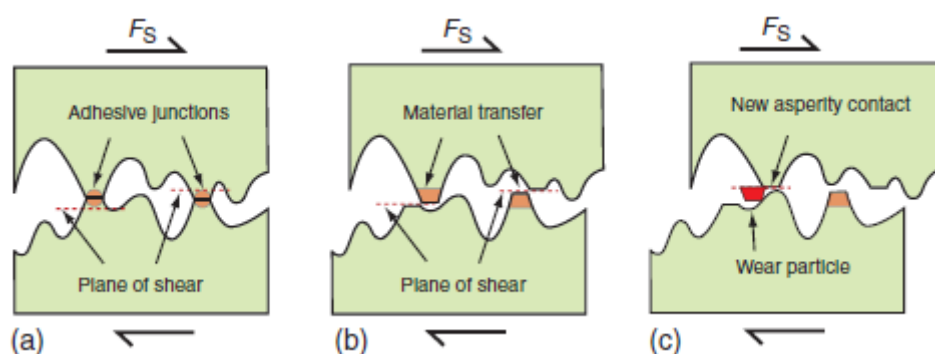
### 1.3.2 Mehanizmi i tehnička fizika trošenja

## Mehanizmi trošenja

**Adhezijsko** trošenje je posljedica djelovanja međuatomskih/međumolekulskih sila u točkama dodira tijela i formiranje mikrozavara, koji se raskidaju pri uzajamnom gibanju tijela uz "preraspodjelu materijala".

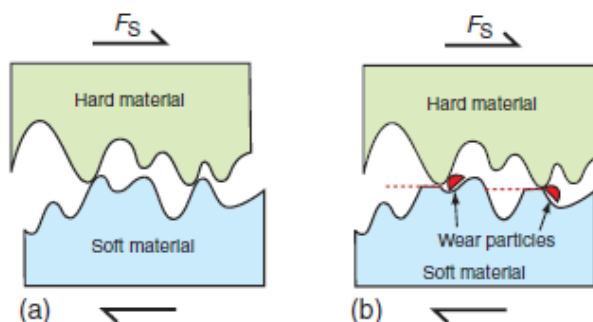


Slično je slikovito adhezijsko trošenje opisano u Ashby-ju [(2007), s. 234].



Adhezijska/abrazijska se trošenja mogu smanjiti: (a) izborom parova materijala otpornih na adhezijsko/abrazijsko trošenje, (b) obradom površinskih slojeva postupcima inženjerstva površina, kao i spriječiti – razdvajanjem površina slojem fluida – maziva.

**Abrazijsko** trošenje je posljedica prodiranja vrhova tvrdog materijala u površinske slojeve mekšeg materijala i njegovim brazdanjem pri uzajamnom gibanju tijela. Slikovito je abrazijsko trošenje opisano u Ashby-ju [(2007), s. 234].



Slika S 01.02 Abrazijsko trošenje [Ashby2007, str. 234]

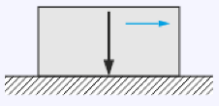
**Erozijsko** trošenje je posljedica djelovanja djelića fluida (*bez ili uz prisutnost krutih čestica nošenih fluidom*) koji velikim brzinama udaraju o površinu tijela. Erozijsko se trošenje može smanjiti: (a) eliminacijom krutih čestica iz fluida, (b) smanjivanjem relativne brzine fluida, (c) promjenom kuta udara fluida u tijelo, (d) izborom pogodnog materijala i (e) pogodnim izmjenama površine materijal postupcima inženjerstva površina.

**Površinski umor** je posljedica stalnih promjena veličina i smjerova naprezanja površinskih slojeva tijela pri uspostavljanju i prekidu kontakta tijela koja se uzajamno gibaju.

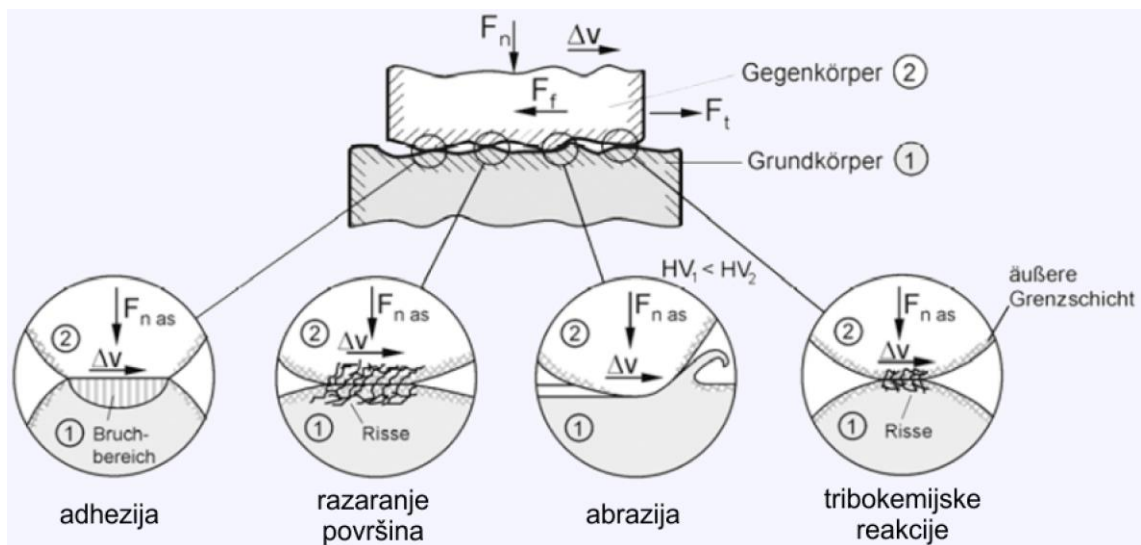
Böge [(2007), s. 463] daje u tabeli opise mehanizama, vizualne izgleda i protumjere za različite mehanizme trošenja (*adhezija, abrazija, površinski umor, tribokemijske reakcije*).

Mehanizam trošenja	Mehanizam	Izgled	Protumjere
Adhezija	zavari u mikro područjima na mjestima mogućih pojava visokih temperatura	Fresserscheinungen, Bremspuren, Aufbauschneide	odabrati parove materijala različitih kemijskih struktura
...	...	...	...

Steinhilper [2 (2008), s. 33] u tabeli sistematizira vrste i mehanizme trošenja.

Struktura sustava	Tribološko opterećenje ( <i>vrsta gibanja i skica</i> )		Vrsta trošenja	Aktivni mehanizam trošenja			
				razaranje površine	abrazija	adhezija	tribokemijske reakcije
...	...	...	...	...	...	...	...
kruto tijelo (1) kruto tijelo (2) ( <i>suho, granično i mješovito trenje</i> ),	klizanje		trošenje pri klizanju	×	×	×	×
...	...	...	...	...	...	...	...

Steinhilper [2 (2008), s. 34] daje preglednu skicu osnovnih mehanizama trošenja.

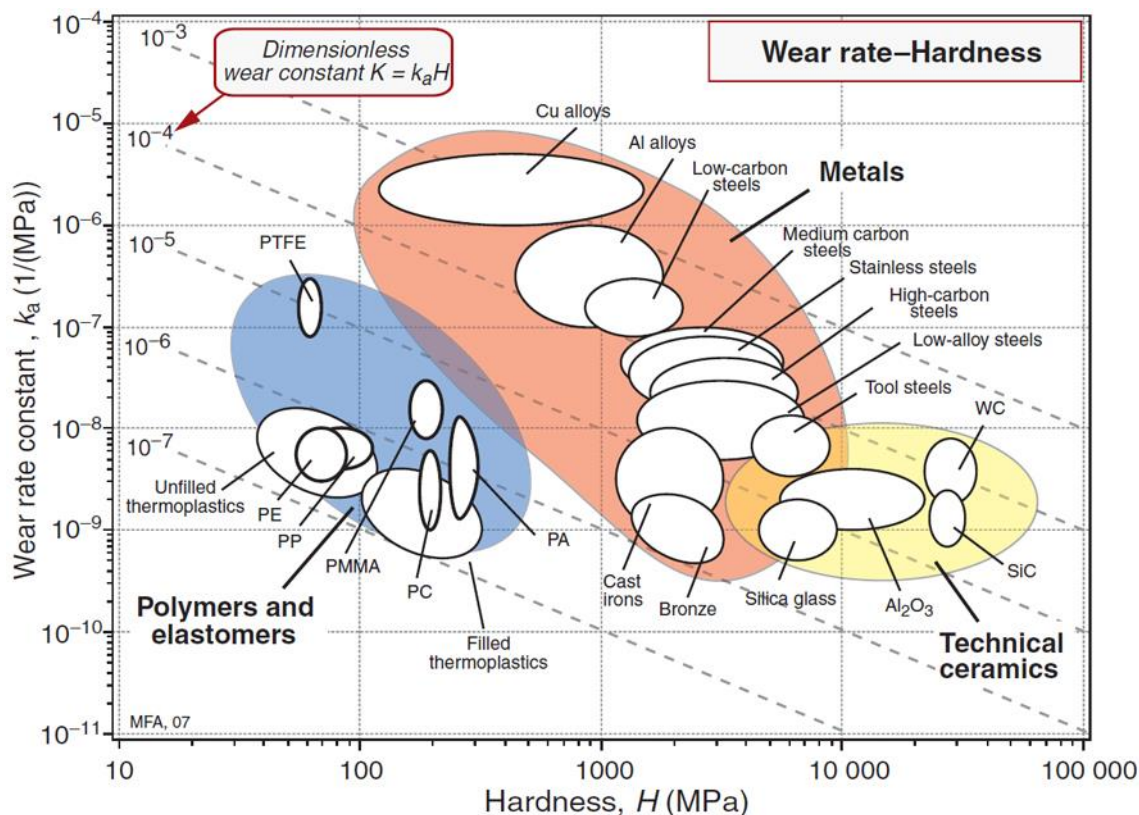


Steinhilper [2 (2008), s. 35] daje tablični pregled osnovnih oblika pojavljivanja glavnih mehanizama trošenja.

Mehanizam trošenja	Oblici pojavljivanja
Adhezija	fresser, rupice, vršci, ljuske, prijenos materijala
...	...

### 1.3.3 Trošenje i materijali

Na S-01.xx su uspoređene konstante trošenja (kojima su razmjerne brzine trošenja) kod podmazivanog klizanja najčešće korištenih konstrukcijskih materijala. Jedinca je tvrdoće,  $H$ , MPa:



Slika S 01.xx Ovisnosti brzine trošenja o tvrdoći [Ashby2007, str. 231]

$$\{H\} = 10 \cdot \{HV\} \quad \text{za: } [H] = \text{MPa}$$

### Površinski slojevi i njihovo nanošenje

Die Oberfläche eines Bauteils ist der Angriffsort für Verschleiß und Korrosion, in einer Oberflächenschicht wirken meist die maximalen, meist wechselnden Spannungen. Sie kann durch Stoffeigenschaftändern oder Beschichten so verändert werden, dass ein einfacher, preisgünstiger Grundwerkstoff in einer bestimmten Eigenschaft „aufgerüstet“ wird, um das Anforderungsprofil zu erfüllen. [Böge (2007), str. 466]

Pregled sustava spojeva:

Technologie	Funktion
<b>Substrat, Substrat-Oberfläche</b>	
Bauteile, Flach- oder Langprodukte, Reinheit und Rauheit durch Vorbehandlungen <sup>1)</sup>	Strukturwerkstoff, Widerstand gegen Verformung und Bruch. Wichtig für die sichere Haftung der Schicht
<b>Zwischenschicht</b>	
wird aufgetragen oder entsteht durch Diffusion bei höheren Temperaturen	Ausgleich der unterschiedlichen Wärmedehnungen von Substrat und Schicht, hemmt Risse und Abschälen
<b>Oberflächenschicht</b>	
durch Beschichten, Fügen oder Stoffeigenschaft- ändern hergestellt	übernimmt Schutz gegen Korrosion, Verschleiß, wirkt als Diffusionssperre, Wärmedämmung



<sup>1)</sup> DIN EN ISO 12944-4 Vorbehandlung der Oberflächen, wichtig für die Schutzdauer einer Korrosionsschicht, (verschiedene Normreinheitsgrade mit steigendem Aufwand); DIN EN 13507/01 Thermisches Spritzen – Vorbehandlung von Oberflächen metallischer Werkstücke für das thermische Spritzen.

Durch Beschichten können sehr viele metallische, keramische und polymere Werkstoffe in verfahrensabhängigen Dicken aufgebracht werden. Die zahlreichen Verfahren ermöglichen es, jeden Substratwerkstoff nahezu mit jedem Schichtwerkstoff zu kombinieren. Durch Stoffeigenschaftändern wird nur eine Randschicht auf die gewünschten Eigenschaften hin verändert.

Es entsteht ein System aus dem Grundwerkstoff (Substrat), einer Zwischenschicht (Interface) und der eigentlichen Schicht, die evtl. auch mehrlagig sein kann (multilayer). Für die Schichthftung ist eine Vorbehandlung der Substratoberfläche notwendig. [Böge (2007), str. 467] [Böge (2011), str. E71]

Bauteile		Verfahrensbeispiele
Dauerfestigkeit		
Wellenabsätze, Federn, Wasser- und Ölpumpen		Verfestigungswalzen und -strahlen, Randschichthärten, Salzbad- nitrieren
Widerstand gegen Zerrüttung		
Zahnflanken, (Wälzlager)		Einsatzhärten, Nitrieren, Randschichthärten
Widerstand gegen Adhäsion		
Gleitende Bauteile	Hartverchromen, Dispersionsschichten, Umschmelzhärten, Thermisch Spritzen (Mo), Nitrieren. PVD- und CVD-Schichten aus TiN, TiC, TiAlN u.a.	
Schneidwerkzeuge		
Widerstand gegen Abrasion		
Teile, in Berührung mit Fördergut, z.B. Fadenführer, Mischerschaufeln, Ketten		Thermisches Spritzen, Auftragschweißen, Auflöten von Hartstoffpartikeln, Borieren
Tribooxidation		
Sitz von Nabe auf Welle		Gleitlacke mit Mo-Disulfid
Widerstand gegen Korrosio		
Stahlkonstruktionen, Blechteile,	Schmelztauchen (Zn, ZnAl, AlSi, AlZn), Galvanisch Beschichten (alle Metalle), Thermisch Spritzen (AlSi), Thermisch Spritzen (NiCrBSi)	
Glaspressformen		
Thermischer Schutz (+Gleitmittel)	Turbinen- Schaufeln, Wälzlager in Ofenanlagen	Plasma-Spritzen ZrO <sub>2</sub> mit Haftschrift. Phosphatieren, hex. Bornitrid-Schichten
Verarbeitungseigenschaften		
lötfähige Schichten auf schwer lötbaren Werkstoffen Halbzeug zur Kaltumformung		Schmelztauchen, Plattieren,  Phosphatieren, hex. Bornitrid-Schichten
Regeneration verschlissener Bauteile		
Werkzeuge, Bauteile zur Förderung und Hart-Zerkleinerung		Thermisch Spritzen oder Auftragschweißen mit Hartlegierungen

## 26 Elementi strojeva 2

durch / aus dem... Zustand	Werkstoffe	Verfahren, Anwendungen	Dicke
flüssigen	AlSi, AlZn, Pb, Sn, ZnAl, ZnFe, SiC>2 + Oxide für Haftung/Farbe Farben, Lacke	Schmelztauchen zum Korrosionsschutz für Halbzeuge und Bauteile aus Stahl, Temperguss (z.B. Feuerverzinken). Emaillieren z. Korrosionsschutz, hitzebeständig < 450° C Anstreichen, Färben, Glasieren, Drucken,	70 bis 120 Mm
körnigpulvrigen	Legierungen, Oxide, Carbide, Nitride Thermoplaste	Thermisch Spritzen mit verschiedenen Wärmequellen, Elektrostatisch Beschichten, Wirbelsintern	0,5... 20 mm
Schweißen Löten	Stahl mit Cr Mn, Ni, Mo Cu-, Ni-, Co-Legierungen, Ni-Hartlote +Hartstoffpartikel	Auftragschweißen nach verschiedenen Schweiß-Verfahren, Auftrag löten	2 bis 6 mm
gas/dampf-förmigen (Vakuum)	Metalle Ni, Ta, Ti, Mo Nb, W, Boride, nd Carbide, Nitride, Oxide, Silicide	CVD-Verfahren: Konturentreue Abscheidung von Hartstoffen als Reaktionsprodukt der zu geführten Gase bei 1200 ... 850° C, plasmaunterstützt bei nur 600 ... 300° C.	1 bis 15 (Lim
gas/dampf-förmigen (Vakuum)	CrN, TiC, TiN, Ti(C,N) Mehrfachschichten diamantartige C:H-Schichten gesteuerte Abscheidung ermöglicht gradierte Schichten	PVD-Verfahren: Ungleichmäßige Abscheidung der Reaktionsprodukte aus Katodenverdampfung oder Abstäuben (Sputtern) mit den zugeführten Gasen. Durch angelegte Spannung entstehen gerichtete Teilchenströme. Schattenwirkung erfordert Rotation der Bauteile. Prozesstemperatur bis 200 ... 500° C	1... 10 jimm
Ionisierten...	Metalle, Legierungen (mit Hartstoff Partikeln). NiP, Ni/SiC, Ni/P/Diamant PFTE-Teilchen in Ni-Matrix	Galvanisch Beschichten zum Korrosionsschutz, zur Dekoration, (Verschleißschutz) Chemisch Beschichten (fremdstromlos) zum Verschleißschutz, Zylinderlaufbüchsen	1 bis 100 um
Schicht durch Fügen aufgebracht			
	Schichtwerkstoff	Grundwerkstoff (Substrat)	Ibis 10 mm
Plattieren	Cu, CuMn, CuNi0Fe, CuNi30Fe, CuAl8Fe, Ni99, NiCr21Mo (Incoloy),	<b>Walzplattieren</b> zum Korrosionsschutz für Stahlbleche und Feinkornbaustähle	
	Al, AlZnl	Hochfeste Cu-haltige, Al-Legierungen	
	Ag, Al 99,5, CuAHONi, CuZn39Sn, CuZn20Al; Ta, Ti	Sprengplattieren für Bleche, auch für Kessel und Kesselböden	
<b>Oberflächenveränderung</b> durch Stoffe igen schaftändern (-> 3.3).			
überwiegend für Stahlsorten	Mechanisch: Verfestigungswalzen und -strahlen, Thermisch Randschichthärten durch Flamm-, Induktions-, Tauch- oder Umschmelzhärten, Thermochemisch Aufkohlen z.. Einsatzhärten, Nitrieren, Borieren, Chromieren, Aluminieren		0,05 bis 2 mm

Zahlreiche abgewandelte CVD- und PVD-Verfahren, auch Laserverfahren, ermöglichen fast beliebige Stoffkombinationen in sehr dünnen, meist mehrlagigen Schichten mit speziellen Aufgaben.

Informationen zu Schichten im Internet unter folgenden Adressen (auch über Suchbegriffe):

- [www.oberflachentechnik.fhg.de](http://www.oberflachentechnik.fhg.de) Fraunhofer-Institute
- [www.AHC-oberflachentechnik.de](http://www.AHC-oberflachentechnik.de) AHC-Oberflachentechnik
- [www.surface-net.de](http://www.surface-net.de) Wissenstransfer Oberflachentechnik

Funktion	Werkstoffe	Verfahren
Reibungsmindernd Anti-haftschichten	Amorphe C:H-Schichten, diamantartig (DLC) 0,1...5 (im, niedrige Reibzahl, sehr hart, für Wellen Oberflächen an Gleitringdichtungen, Einspritzpumpenteile C:H:Si:O-Schichten für Extrusionswerkzeuge	HF-Plasma-CVD
Verchleißschutz	Hartstoffe 0,5...5mm auf Zerspan- und Umform Werkzeuge	Laserstrahlbeschich-

		ten
Schleifwerkzeug	Polykristalliner Diamant (PKD) 9000.1000 HV für feinste Oberflächenbearbeitung	CVD
Wärmedämmung, Antireflex	Mehrlagige Schicht mit Ag-Anteil (10 nm) auf Architekturglas	HF-Plasma-CVD
Standzeiterhöhung, Werkzeuge	TiC, ZrN, Ti(CN), TiAlN, CrN, Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , meist mehrlagig, für Werkzeuge aus HSS-Stählen und Hartmetallen	PVD
Kratzschutz für Glas	Al-Oxid im Nanobereich	HF-Plasma-CVD

## Određivanje vijeka trajanja elemenata

**Brzina trošenja** se može opisati sa:

$$W = \frac{V_m}{L_k}$$

gdje je:  $V_m$  – volumen materijala odvojenog trošenjem, m<sup>3</sup>,  
 $L_k$  – duljina puta klizanja, m.

a u praksi se više koristi specifična brzina trošenja:

$$\Omega = \frac{W}{A_h}$$

gdje je:  $A_h$  – nazivna dodirna površina, m<sup>2</sup>.

Brzina trošenja je razmjerna pritisku:

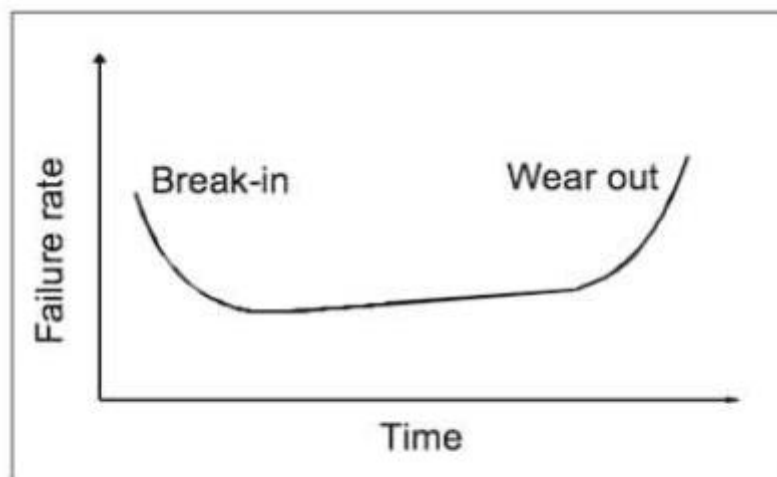
$$W = k_a \cdot F_n$$

gdje je:  $k_a$  – konstanta trošenja, 1/MPa.

$$\Omega = \frac{k_a \cdot F_n}{A_h} = k_a \cdot p$$

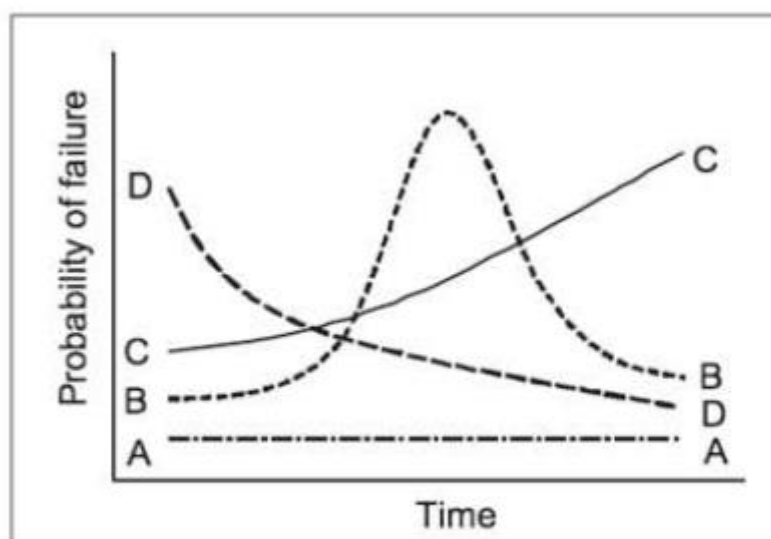
Prema tome, pri aktualnom tlaku, specifična je brzina trošenja veća što je veća konstanta trošenja aktualnog materijala.

The failure process is usually complex, consisting of at least three types of failures: initial failures, wear out failures and those that fail in between. Figure 22.2, the so-called bathtub curve, represents a typical failure pattern. In a well-designed system, the majority of failures are completely random. These would be depicted by the bathtub curve shown during the period when the failure rate is lowest, and for most purposes can be regarded as constant. [Czichos2010/677]



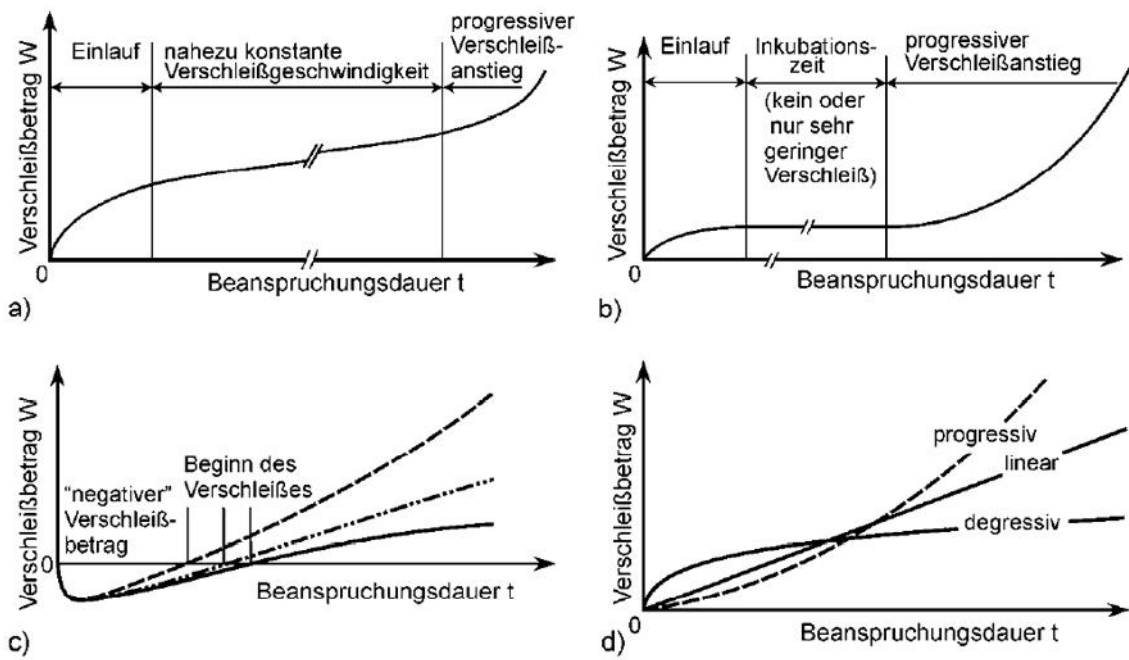
**Figure 22.2** Three-stage (bathtub) failure curve

Other common forms of failure patterns are shown in Figure 22.3. Line A can usually be applied to parts that seldom fail, but are subjected to damage at any time. Line B represents a failure pattern for an item with the majority of failures occurring at midlife. For example, a light bulb guaranteed for a certain number of hours. Line C exhibits a gradual increase of failures, true of many mechanical moving parts subjected to gradual wear. Line D demonstrates that when early-age failures have been removed by burn-in, the time to occurrence of wear out failures is very great (as with electronic parts). [Czichos2010/677]



**Figure 22.3** Common failure patterns

Steinhilper [2 (2008), s. 36] daje četiri karakteristična dijagrama trošenja u ovisnosti o trajanju triboloških opterećenja i u tekstu ih ukratko opisuje.



## 1.4 Podmazivanje i maziva

### 1.4.1 Osnove podmazivanja

[Steinhilper 2 (2008), str. 40]

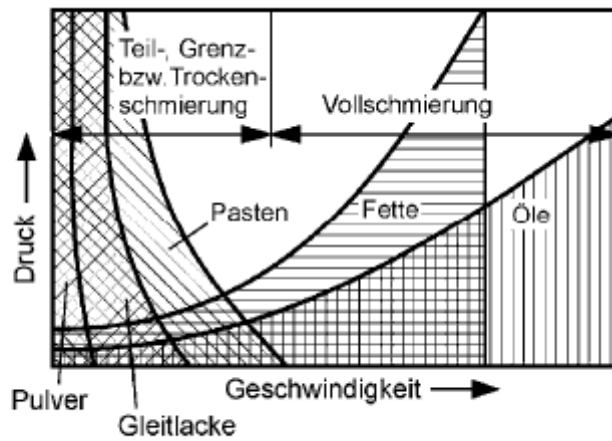
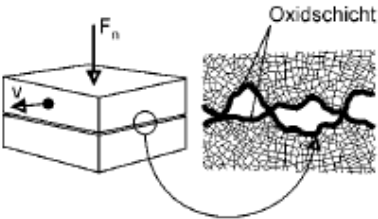
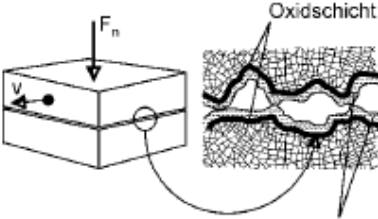
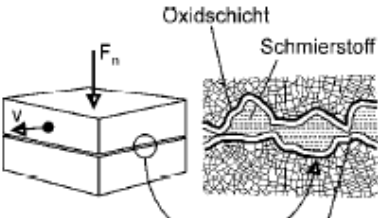
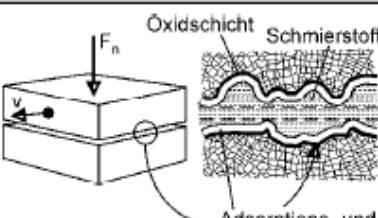


Abb. 10.17. Einsatzbereich von Schmierstoffen in Anlehnung an [Dey82]

[Norton (2006), str. 600]

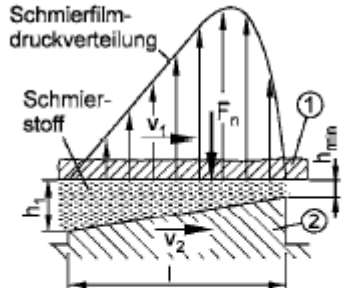
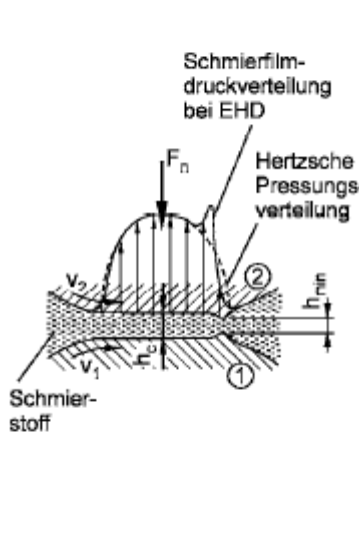
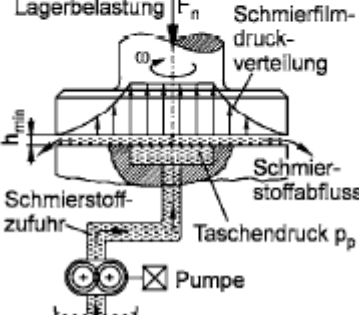
[Steinhilper 2 (2008), str. 41]

Tabelle 10.9. Reibungs- und Schmierzustände

	Reibungs- / Schmierzustände
	<p>1. <i>Festkörperreibung / keine Schmierung</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• unmittelbarer Kontakt der Reibpartner</li> <li>• Bildung von oxidischen Reaktionsschichten und Adsorption von Gasen</li> <li>• hohe Verschleißraten wahrscheinlich, Fressgefahr</li> <li>• Reibungszahlen (Anhaltswerte): <math>f \approx 0,35</math> bis <math>&gt; 1</math></li> <li>• Sonderfälle <ul style="list-style-type: none"> <li>* <i>Grenzschichtreibung</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Reibung zwischen festen Grenzschichten mit gegenüber dem Grundmaterial modifizierten Eigenschaften (z.B. Oxidschichten)</li> </ul> </li> <li>* <i>Reibung von metallisch reinen Oberflächen</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- direkte Berührung von metallisch reinen Oberflächen (z.B. bei spanender Bearbeitung und bei Fressvorgängen)</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>
	<p>2. <i>Grenzreibung / Grenzschmierung</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Oberflächen der Reibpartner mit einem dünnen, reibungsmindernden Schmierstofffilm bedeckt</li> <li>• Bildung von reibungsmindernden, leicht scherbaren Schichten auf den Oberflächen durch Physisorption, Chemisorption und tribochemischer Reaktion mit Wirkstoffen (Additiven) aus dem Schmierstoff</li> <li>• geringere Verschleißraten als bei Festkörperreibung</li> <li>• hydrodynamische Schmierwirkung vernachlässigbar</li> <li>• Reibungszahlen (Anhaltswerte): <math>f \approx 6 \cdot 10^{-2}</math> bis <math>2 \cdot 10^{-1}</math></li> </ul>
	<p>3. <i>Mischreibung / Teilschmierung</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Schmierfilm nicht dick genug, um Oberflächen vollständig voneinander zu trennen; Folge: Rauheitskontakte</li> <li>• gleichzeitiges Vorliegen von Grenz- und Flüssigkeitsreibung</li> <li>• Belastung wird teilweise vom Schmierfilm durch hydrodynamische Wirkung und teilweise von den Rauheitskontakten aufgenommen</li> <li>• wie bei Grenzreibung auch hier Einsatz von Additiven im Schmierstoff wichtig, um reibungsmindernde Adsorptions- und Reaktionsschichten auf den Oberflächen zu erzeugen</li> <li>• Verschleißrate um so geringer, je höher hydrodynamischer Traganteil</li> <li>• Reibungszahlen (Anhaltswerte): <math>f \approx 10^{-3}</math> bis <math>10^{-1}</math></li> </ul>
	<p>4. <i>Flüssigkeitsreibung / Vollschrnung</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reibpartner sind durch einen flüssigen Film lückenlos voneinander getrennt, der hydrodynamisch oder hydrostatisch erzeugt werden kann</li> <li>• quasi verschleißfreier Betrieb</li> <li>• Reibungszahlen (Anhaltswerte): <math>f \approx 6 \cdot 10^{-4}</math> bis <math>5 \cdot 10^{-3}</math></li> </ul>

[Steinhilper 2 (2008), str. 43]

Tabelle 10.10. Verschiedene Arten der Vollschrnerung

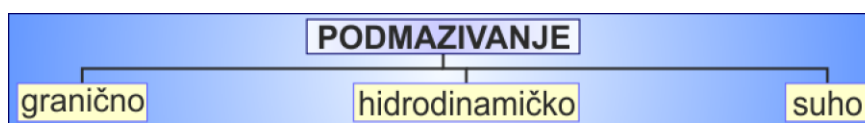
	<p><b>Hydrodynamik [LaSt78]</b> bei gegebener Geometrie</p> $h_{\min} \sim \sqrt{\frac{\bar{v} \eta}{F_n}} = (\bar{v} \eta)^{0,5} F_n^{-0,5}$ $\bar{v} = (v_1 - v_2) / 2$ mittlere Schmierstoff-Fördergeschwindigkeit in den engsten Schmier-spalt (Regelfall: $v_2 = 0$ ; $\bar{v} = v_1 / 2$ ) $\eta$ mittlere Viskosität des Schmierstoffs im Schmierfilm $F_n$ Belastung
	<p><b>Elasto-Hydrodynamik [Ham94]</b> a) harte Werkstoffoberflächen (harte EHD) elliptische Kontaktfläche, gegebene Geometrie</p> $h_{\min} \sim (\bar{v} \eta_0)^{0,68} \alpha^{0,49} E^{*-0,117} F_n^{-0,073}$ $h_{\min} / h_c \approx 0,56$ $\bar{v}$ mittlere Fördergeschwindigkeit in den engsten Schmier-spalt $\bar{v} = (v_1 + v_2) / 2$ $\eta_0$ Viskosität des Schmierstoffs am Spalteintritt bei $p=0$ $\alpha$ Viskositäts-Druck-Koeffizient $\frac{1}{E^*} = \frac{1}{2} \left[ \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right]$ reduzierter E-Modul $E_1$ und $E_2$ E-Modul von Reibkörper 1 und 2 $\nu_1$ und $\nu_2$ Querkontraktionszahl von Reibkörper 1 und 2 $F_n$ Belastung b) weiche Werkstoffoberflächen (weiche EHD) elliptische Kontaktfläche, gegebene Geometrie $h_{\min} \sim (\bar{v} \eta_0)^{0,65} E^{*-0,44} F_n^{-0,21}$ ; $h_{\min} / h_c \approx 0,77$
	<p><b>Hydrostatik [LaSt78]</b> bei gegebener Geometrie und konstantem Schmierstoffvolumenstrom (<math>\dot{V} = \text{konst.}</math>)</p> $h_{\min} \sim \sqrt[3]{\frac{\eta}{F_n}} = \eta^{0,33} F_n^{-0,33}$ $\eta$ mittlere Viskosität des Schmierstoffs im Schmier-spalt $F_n$ Belastung

**Podmazivanje** – unošenje sredstava za podmazivanje (*plinovito, tekuće ili kruto mazivo*) koja smanjuju trenje i trošenje između dodirnih površina tijela koja se uzajamno gibaju.

Prema načinu podmazivanja razlikuju se:

Five distinct forms of lubrication may be identified: [Budynas (2011) str. 618]

- Hydrodynamic
- Hydrostatic
- Elastohydrodynamic
- Boundary
- Solid film



- **Granično podmazivanje** – dolazi do neposrednog dodira tijela koja se uzajamno gibaju uslijed: (a) prevelikog opterećenja tijela ili (b) nedovoljne količine sredstva za podmazivanje.

[Dorf (2007), str. 348]

### Hydrodynamic Lubrication

Hydrodynamic (HD) lubrication is sometimes called *fluid-film* or *thick-film lubrication*. As a bearing with convergent shape in the direction of motion starts to spin (slide in the longitudinal direction) from rest, a thin layer of fluid is pulled through because of viscous entrainment and is then compressed between the bearing surfaces, creating a sufficient (hydrodynamic) pressure to support the load without any external pumping agency. This is the principle of hydrodynamic lubrication, a mechanism that is essential to the efficient functioning of the self-acting journal and thrust bearings widely used in modern industry. A high load capacity can be achieved in the bearings that operate at high speeds and low loads in the presence of fluids of high viscosity.

Fluid film can also be generated only by a reciprocating or oscillating motion in the normal direction (*squeeze*), which may be fixed or variable in magnitude (transient or steady state). This load-carrying phenomenon arises from the fact that a viscous fluid cannot be instantaneously squeezed out from the interface with two surfaces that are approaching each other. It takes time for these surfaces to meet, and during that interval—because of the fluid's resistance to extrusion—a pressure is built up and the load is actually supported by the fluid film. When the load is relieved or becomes reversed, the fluid is sucked in and the fluid film often can recover its thickness in time for the next application. The squeeze phenomenon controls the buildup of a water film under the tires of automobiles and airplanes on wet roadways or landing strips (commonly known as *hydroplaning*) that have virtually no relative sliding motion.

HD lubrication is often referred to as the ideal lubricated contact condition because the lubricating films are normally many times thicker (typically 5–500  $\mu\text{m}$ ) than the height of the irregularities on the bearing surface, and solid contacts do not occur. The coefficient of friction in the HD regime can be as small as 0.001 (Fig. 21.8). The friction increases slightly with the sliding speed because of viscous drag. The behavior of the contact is governed by the bulk physical properties of the lubricant, notable viscosity, and the frictional characteristics arise purely from the shearing of the viscous lubricant.

Insufficient surface area, a drop in the velocity of the moving surface, a lessening in the quantity of lubricant delivered to a bearing, an increase in the bearing load, or an increase in lubricant temperature resulting in a decrease in viscosity—any one of these—may prevent the buildup of a film thick enough for full-film lubrication. When this happens, the highest asperities may be separated by lubricant films only several molecular dimensions in thickness. This is called *boundary lubrication*. The change from hydrodynamic to boundary lubrication is not at all a sudden or abrupt one. It is probable that a mixed hydrodynamic- and boundary-type lubrication occurs first, and as the surfaces move closer together, the boundary-type lubrication becomes predominant. The viscosity of the lubricant is not of as much importance with boundary lubrication as is the chemical composition. [Budynas (2011) str. 619]



- **Hidrodinamičko podmazivanje** – tijela uzajamno gibaju u potpunosti razdvojena plinovitim ili tekućim sredstvom za podmazivanje.

[Dorf (2007), str. 349]

### Boundary Lubrication

As the load increases, speed decreases or the fluid viscosity decreases in the Stribeck curve shown in Fig. 21.8; the coefficient of friction can increase sharply and approach high levels (about 0.2 or much higher). In this region it is customary to speak of boundary lubrication. This condition can also occur in a starved contact. Boundary lubrication is that condition in which the solid surfaces are so close together that surface interaction between monomolecular or multimolecular films of lubricants (liquids or gases) and the solids dominate the contact. (This phenomenon does not apply to solid lubricants.) The concept is represented in Fig. 21.8, which shows a microscopic cross section of films on two surfaces and areas of asperity contact. In the absence of boundary lubricants and gases (no oxide films), friction may become very high ( $>1$ ).

*Hydrodynamic lubrication* means that the load-carrying surfaces of the bearing are separated by a relatively thick film of lubricant, so as to prevent metal-to-metal contact, and that the stability thus obtained can be explained by the laws of fluid mechanics. Hydrodynamic lubrication does not depend upon the introduction of the lubricant under pressure, though that may occur; but it does require the existence of an adequate supply at all times. The film pressure is created by the moving surface itself pulling the lubricant into a wedge-shaped zone at a velocity sufficiently high to create the pressure necessary to separate the surfaces against the load on the bearing. Hydrodynamic lubrication is also called *full-film*, or *fluid, lubrication*.

[Dorf (2007), str. 348]

### Hydrostatic Lubrication

Hydrostatic bearings support load on a thick film of fluid supplied from an external pressure source—a pump—which feeds pressurized fluid to the film. For this reason, these bearings are often called "externally pressurized." Hydrostatic bearings are designed for use with both incompressible and compressible fluids. Since hydrostatic bearings do not require relative motion of the bearing surfaces to build up the load-supporting pressures as necessary in hydrodynamic bearings, hydrostatic bearings are used in applications with little or no relative motion between the surfaces. Hydrostatic bearings may also be required in applications where, for one reason or another, touching or rubbing of the bearing surfaces cannot be permitted at startup and shutdown. In addition, hydrostatic bearings provide high stiffness. Hydrostatic bearings, however, have the disadvantage of requiring high-pressure pumps and equipment for fluid cleaning, which adds to space and cost.

Hydrostatic lubrication is obtained by introducing the lubricant, which is sometimes air or water, into the load-bearing area at a pressure high enough to separate the surfaces with a relatively thick film of lubricant. So, unlike hydrodynamic lubrication, this kind of lubrication does not require motion of one surface relative to another. We shall not deal with hydrostatic lubrication in this book, but the subject should be considered in designing bearings where the velocities are small or zero and where the frictional resistance is to be an absolute minimum.

[Dorf (2007), str. 348]

### Elastohydrodynamic Lubrication

Elastohydrodynamic (EHD) lubrication is a subset of HD lubrication in which the elastic deformation of the bounding solids plays a significant role in the HD lubrication process. The film thickness in EHD lubrication is thinner (typically  $0.5\text{--}2.5\ \mu\text{m}$ ) than that in HD lubrication (Fig. 21.8), and the load is still primarily supported by the EHD film. In isolated areas, asperities may actually touch. Therefore, in liquid lubricated systems, boundary lubricants that provide boundary films on the surfaces for protection against any solid-solid contact are used. Bearings with heavily loaded contacts fail primarily by a fatigue mode that may be significantly affected by the lubricant. EHD lubrication is most readily induced in heavily loaded contacts (such as machine elements of low geometrical conformity), where loads act over relatively small contact areas (on the order of one-thousandth of journal bearing), such as the point contacts of ball bearings and the line contacts of roller bearings and gear teeth. EHD phenomena also occur in some low elastic modulus contacts of high geometrical conformity, such as seals and conventional journal and thrust bearings with soft liners.

Elastohydrodynamic lubrication is the phenomenon that occurs when a lubricant is introduced between surfaces that are in rolling contact, such as mating gears or rolling bearings. The mathematical explanation requires the Hertzian theory of contact stress and fluid mechanics.

[Dorf (2007), str. 349]

### Mixed Lubrication

The transition between the hydrodynamic/elastohydrodynamic and boundary lubrication regimes constitutes a gray area known as *mixed lubrication*, in which two lubrication mechanisms may be functioning. There may be more frequent solid contacts, but at least a portion of the bearing surface remains supported by a partial hydrodynamic film (Fig. 21.8). The solid contacts, if between unprotected virgin metal surfaces, could lead to a cycle of adhesion, metal transfer, wear particle formation, and snowballing into seizure. However, in liquid lubricated bearings, the physio- or chemisorbed or chemically reacted films (boundary lubrication) prevent adhesion during most asperity encounters. The mixed regime is also sometimes referred to as *quasihydrodynamic*, *partial fluid*, or *thin-film* (typically  $0.5\text{--}2.5\ \mu\text{m}$ ) lubrication.

- **Suho podmazivanje** – tijela koja se uzajamno gibaju su razdvojena krutim sredstvom za podmazivanje (*grafit, molibden-disulfid*).

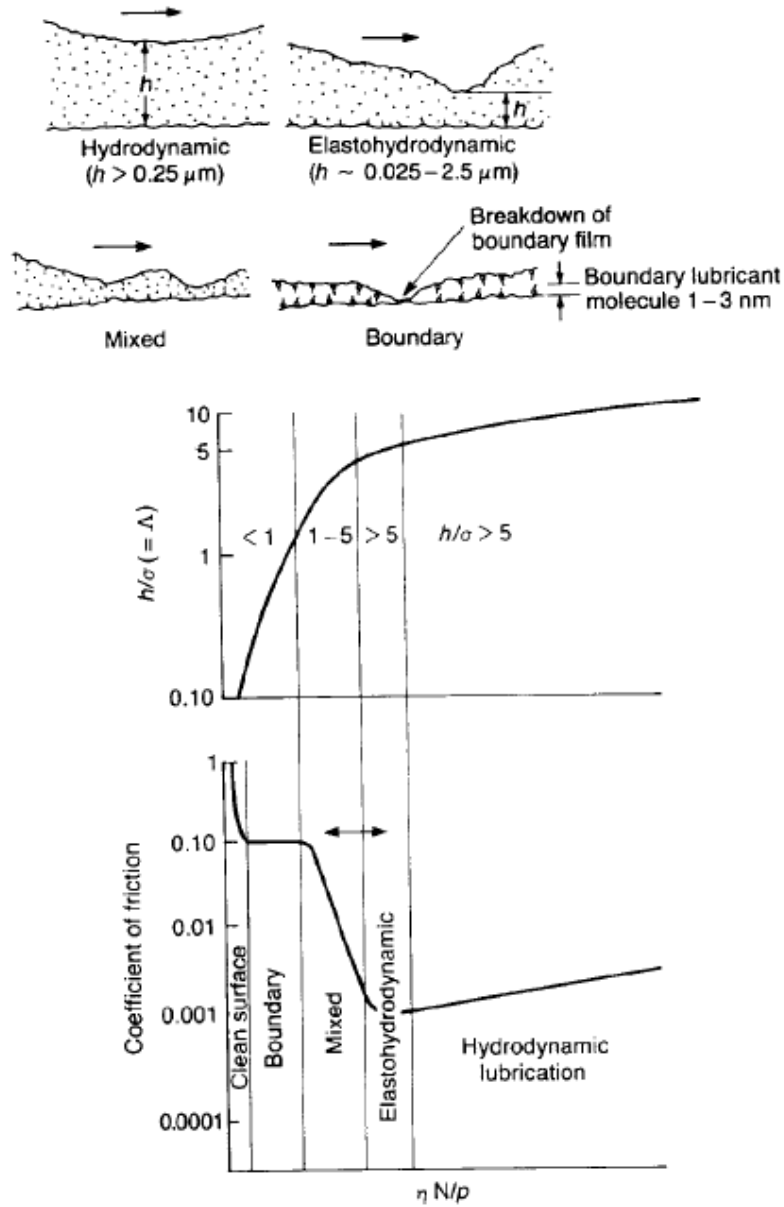
When bearings must be operated at extreme temperatures, a solid-film lubricant such as graphite or molybdenum disulfide must be used because the ordinary mineral oils are not satisfactory. Much research is currently being carried out in an effort, too, to find composite bearing materials with low wear rates as well as small frictional coefficients.

The object of lubrication is to reduce friction, wear, and heating of machine parts that move relative to each other. A lubricant is any substance that, when inserted between the moving surfaces, accomplishes these purposes. In a sleeve bearing, a shaft, or *journal*, rotates or oscillates within a sleeve, or *bushing*, and the relative motion is sliding. In an antifriction bearing, the main relative motion is rolling. A follower may either roll or slide on the cam. Gear teeth mate with each other by a combination of rolling and sliding. Pistons slide within their cylinders. All these applications require lubrication to reduce friction, wear, and heating.

The field of application for journal bearings is immense. The crankshaft and connecting-rod bearings of an automotive engine must operate for thousands of miles at high temperatures and under varying load conditions. The journal bearings used in the steam turbines of power-generating stations are said to have reliabilities approaching 100 percent. At the other extreme there are thousands of applications in which the loads are light and the service relatively unimportant; a simple, easily installed bearing is required, using little or no lubrication. In such cases an antifriction bearing might be a poor answer because of the cost, the elaborate enclosures, the close tolerances, the radial space required, the high speeds, or the increased inertial effects. Instead, a nylon bearing requiring no lubrication, a powder-metallurgy bearing with the lubrication "built in," or a bronze bearing with ring oiling, wick feeding, or solid-lubricant film or grease lubrication might be a very satisfactory solution. Recent metallurgy developments in bearing materials, combined with increased knowledge of the lubrication process, now make it possible to design journal bearings with satisfactory lives and very good reliabilities.

*[Dorf (2007), str. 347]*

**Figure 21.8** Lubricant film parameter ( $\Lambda$ ) and coefficient of friction as a function of  $\eta N/p$  (Stribeck curve) showing different lubrication regimes observed in fluid lubrication without an external pumping agency. Schematics of interfaces operating in different lubrication regimes are also shown.



[Steinhilper 2 (2008), str. 26]

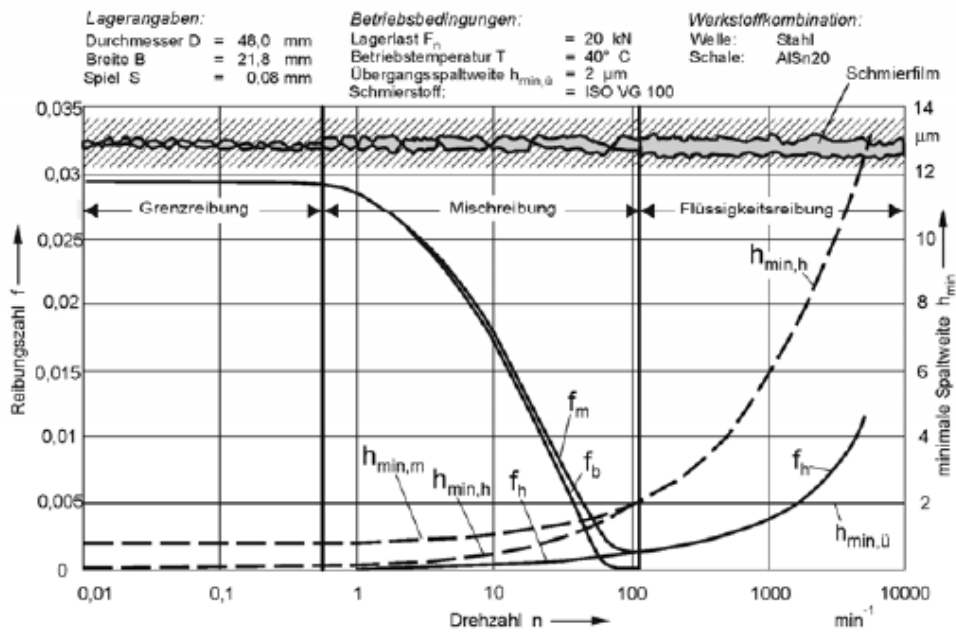
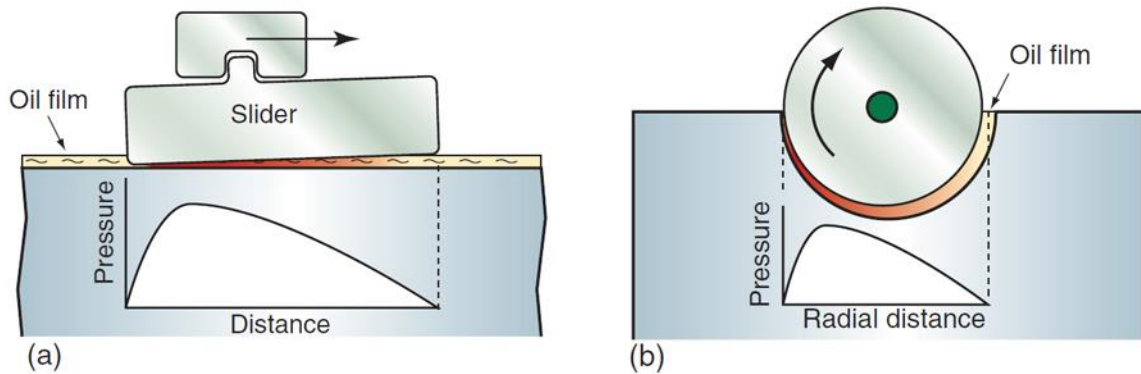
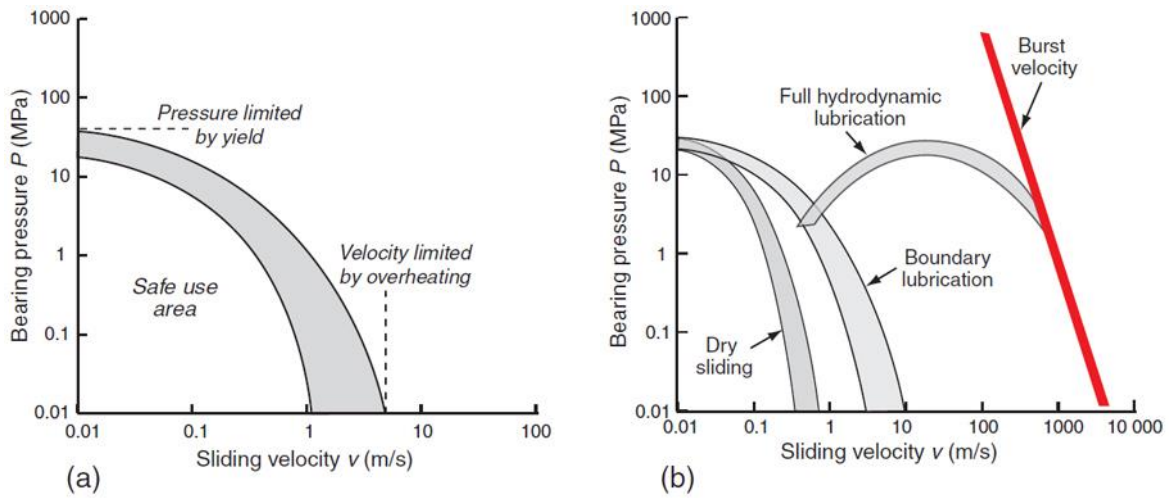


Abb. 10.7. Stribeck-Kurve, minimale Schmierfilmdicken und Reibungszustände in einem Radialgleitlager ( $f_m$  Reibungszahl bei Mischreibung,  $f_b$  Reibungszahl bei Grenzreibung,  $f_h$  Reibungszahl bei Flüssigkeitsreibung,  $h_{min,ü}$  minimale Schmierfilmdicke beim Übergang von Flüssigkeits- in die Mischreibung,  $h_{min,h}$  minimale Schmierfilmdicke bei Flüssigkeitsreibung,  $h_{min,m}$  minimale Schmierfilmdicke bei Mischreibung)

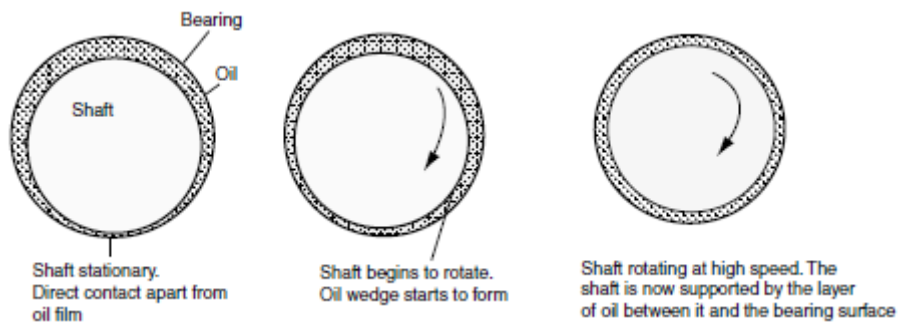
### 1.4.2 Mehanizmi i tehnička fizika podmazivanja



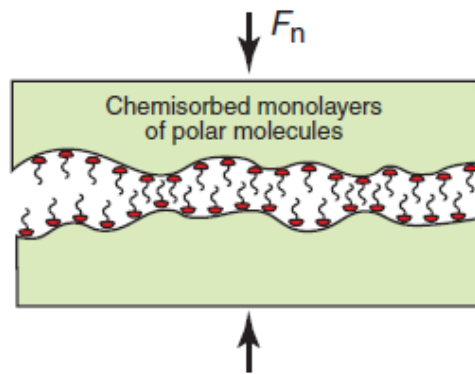
[Ashby2007, str. 236]



[Ashby2007, str. 239]



[Bonnick 2011, str. 111]



[Ashby2007, str. 235]

[Steinhilper 2 (2008), str. 49]

Bei der *Physisorption* werden im Schmierstoff enthaltene Zusätze (z.B. AW (anti wear)-Zusätze), wie gesättigte und ungesättigte Fettsäuren, natürliche und synthetische Fettsäureester und primäre und sekundäre Alkohole auf den tribologisch beanspruchten Oberflächen adsorbiert. Gemeinsam haben solche Stoffe ein hohes Dipolmoment auf Grund von mindestens einer polaren Gruppe im Molekül (Abb. 10.19.).

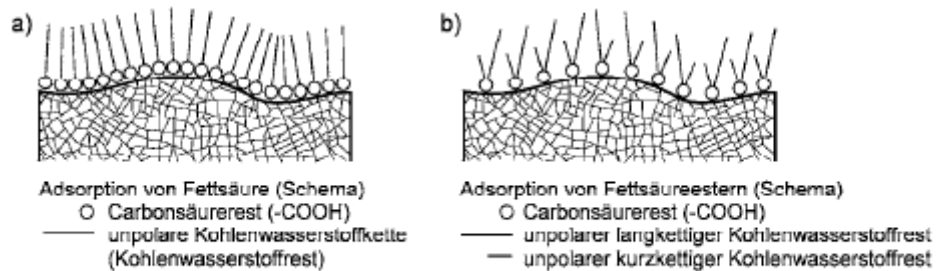


Abb. 10.19. Adsorption an Metalloberflächen nach [MöNa02]

[Steinhilper 2 (2008), str. 50]

Durch *tribochemische Reaktionen* zwischen Bestandteilen des Schmierstoffes und der metallischen Werkstoffoberfläche werden Reaktionsschichten gebildet, die i. Allg. thermisch und mechanisch höher belastbar sind als physis- oder chemisorptiv gebildete Schichten. Dazu werden den Schmierstoffen Chlor-, Phosphor- oder Schwefelverbindungen als Additive (EP (extreme pressure)-Zusätze) zugesetzt. Die Wirksamkeit solcher EP-Additive hängt von der Geschwindigkeit der Reaktionsschichtbildung ab, welche von der Aktivierungsenergie der Reaktion, der Oberflächentemperatur und der Additivkonzentration beeinflusst wird. Die EP-Wirkstoffe reagieren selbst oder deren thermische Spaltprodukte mit dem Oberflächenmetalloxid in sehr kurzer Zeit ( $10^{-6}$  bis  $10^{-7}$  s) unter Bildung einer Reaktionsschicht, die gut haftet und leicht scherbare ist (Abb. 10.20.).

Während bei hydrodynamischer und elastohydrodynamischer Schmierung nur sehr geringer bzw. kein Verschleiß auftritt, da keine Rauheitskontakte vorkommen, wachsen bei Grenzschmierung die Anzahl der Rauheitskontakte und damit die Verschleißrate mit zunehmender Last stark an. Gegenüber ungeschmierten Bedingungen liegen die Verschleißraten bei Grenzschmierung jedoch wesentlich niedriger.

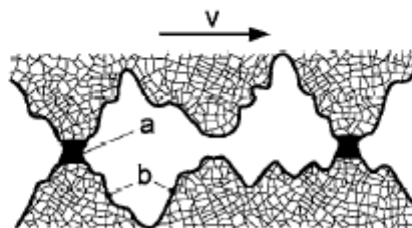


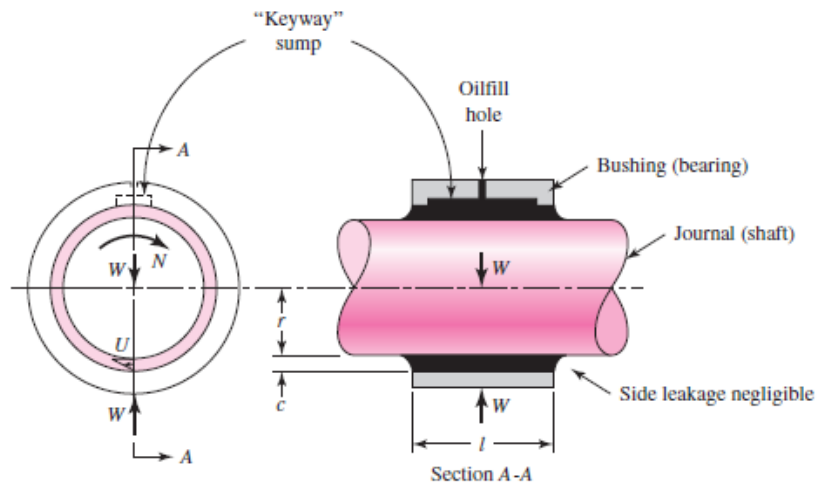
Abb. 10.20. Bildung einer Schutzschicht bei EP-Wirkstoffen mit Schwefelverbindungen in Anlehnung an [MöNa02]: a) Metallsulfidverbindung; b) Metalloberfläche

The phenomenon of bearing friction was first explained by Petroff on the assumption that the shaft is concentric. Though we shall seldom make use of Petroff's method of analysis in the material to follow, it is important because it defines groups of dimensionless parameters and because the coefficient of friction predicted by this law turns out to be quite good even

when the shaft is not concentric. Let us now consider a vertical shaft rotating in a guide bearing. It is assumed that the bearing carries a very small load, that the clearance space is completely filled with oil, and that leakage is negligible (Fig. 12–3). We denote the radius of the shaft by  $r$ ,

**Figure 12-3**

Petroff's lightly loaded journal bearing consisting of a shaft journal and a bushing with an axial-groove internal lubricant reservoir. The linear velocity gradient is shown in the end view. The clearance  $c$  is several thousandths of an inch and is grossly exaggerated for presentation purposes.



[Budynas (2011) str. 621]

the radial clearance by  $c$ , and the length of the bearing by  $l$ , all dimensions being in inches. If the shaft rotates at  $N$  rev/s, then its surface velocity is  $U = 2\pi rN$  in/s. Since the shearing stress in the lubricant is equal to the velocity gradient times the viscosity, from Eq. (12–2) we have

$$\tau = \mu \frac{U}{h} = \frac{2\pi r \mu N}{c}$$

$$T = (\tau A)(r) = \left( \frac{2\pi r \mu N}{c} \right) (2\pi r l)(r) = \frac{4\pi^2 r^3 l \mu N}{c}$$

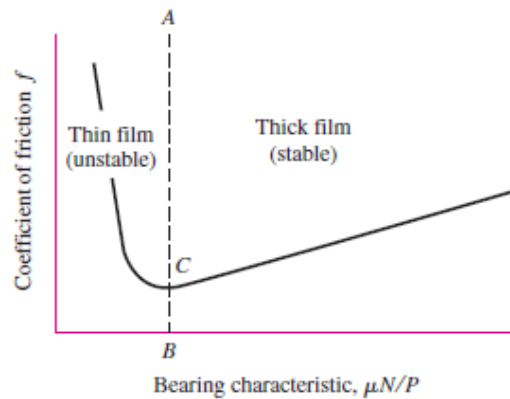
$$T = f W r = (f)(2r l P)(r) = 2r^2 f l P$$

$$f = 2\pi^2 \frac{\mu N}{P} \frac{r}{c}$$

Equation (12–6) is called Petroff's equation and was first published in 1883. The two quantities  $\mu N/P$  and  $r/c$  are very important parameters in lubrication. Substitution of the appropriate dimensions in each parameter will show that they are dimensionless.

The difference between boundary and hydrodynamic lubrication can be explained by reference to Fig. 12–4. This plot of the change in the coefficient of friction versus the bearing characteristic  $\mu N/P$  was obtained by the McKee brothers in an actual test of friction.<sup>2</sup> The plot is important because it defines stability of lubrication and helps us to understand hydrodynamic and boundary, or thin-film, lubrication.





[Budynas (2011) str. 623]

Recall Petroff's bearing model in the form of Eq. (12–6) predicts that  $f$  is proportional to  $\mu N/P$ , that is, a straight line from the origin in the first quadrant. On the coordinates of Fig. 12–4 the locus to the right of point  $C$  is an example. Petroff's model presumes thick-film lubrication, that is, no metal-to-metal contact, the surfaces being completely separated by a lubricant film.

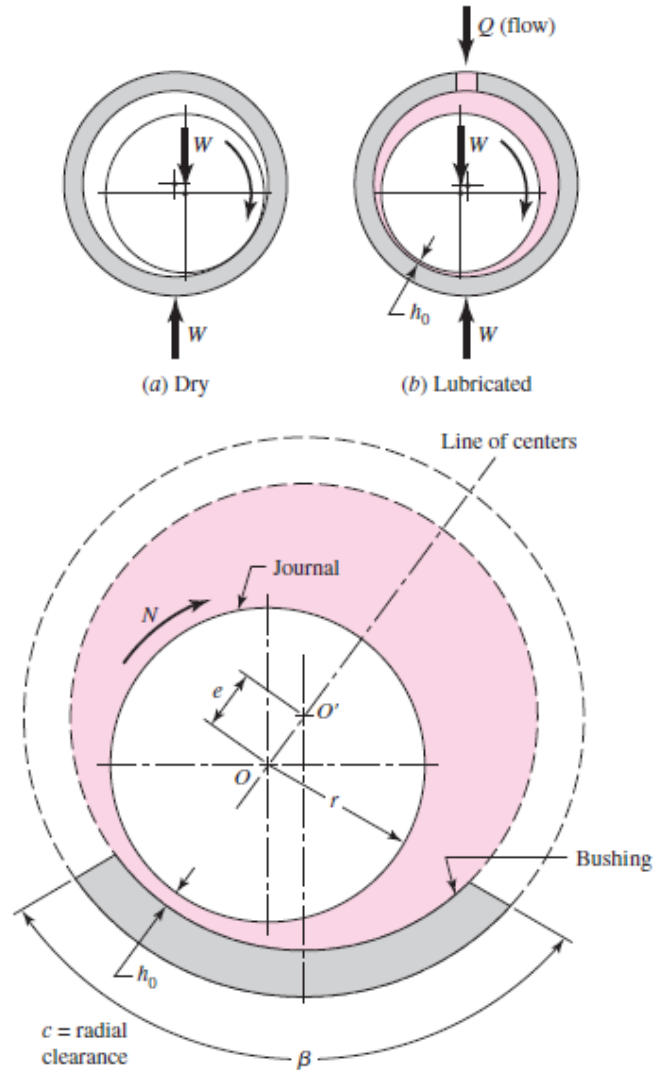
The McKee abscissa was  $ZN/P$  (centipoise  $\times$  rev/min/psi) and the value of abscissa  $B$  in Fig. 12–4 was 30. The corresponding  $\mu N/P$  (reyn  $\times$  rev/s/psi) is  $0.33(10^{-6})$ . Designers keep  $\mu N/P \geq 1.7(10^{-6})$ , which corresponds to  $ZN/P \geq 150$ . A design constraint to keep thick-film lubrication is to be sure that

$$\frac{\mu N}{P} \geq 1.7(10^{-6})$$

Suppose we are operating to the right of line  $BA$  and something happens, say, an increase in lubricant temperature. This results in a lower viscosity and hence a smaller value of  $\mu N/P$ . The coefficient of friction decreases, not as much heat is generated in shearing the lubricant, and consequently the lubricant temperature drops. Thus the region to the right of line  $BA$  defines *stable lubrication* because variations are self-correcting. To the left of line  $BA$ , a decrease in viscosity would increase the friction. A temperature rise would ensue, and the viscosity would be reduced still more. The result would be compounded. Thus the region to the left of line  $BA$  represents *unstable lubrication*. It is also helpful to see that a small viscosity, and hence a small  $\mu N/P$ , means that the lubricant film is very thin and that there will be a greater possibility of some

Let us now examine the formation of a lubricant film in a journal bearing. Figure 12–5a shows a journal that is just beginning to rotate in a clockwise direction. Under starting conditions, the bearing will be dry, or at least partly dry, and hence the journal will climb or roll up the right side of the bearing as shown in Fig. 12–5a. Now suppose a lubricant is introduced into the top of the bearing as shown in Fig. 12–5b. The action of the rotating journal is to pump the lubricant around the bearing in a clockwise direction. The lubricant is pumped into a wedge-shaped space and forces the journal over to the other side. A *minimum film thick-*

ness  $h_0$  occurs, not at the bottom of the journal, but displaced clockwise from the bottom as in Fig. 12–5*b*. This is explained by the fact that a film pressure in the converging half of the film reaches a maximum somewhere to the left of the bearing center.



[Budynas (2011) str. 624]

Figure 12–5 shows how to decide whether the journal, under hydrodynamic lubrication, is eccentrically located on the right or on the left side of the bearing. Visualize the journal beginning to rotate. Find the side of the bearing upon which the journal tends to roll. Then, if the lubrication is hydrodynamic, mentally place the journal on the opposite side.

The nomenclature of a journal bearing is shown in Fig. 12–6. The dimension  $c$  is the *radial clearance* and is the difference in the radii of the bushing and journal. In Fig. 12–6 the center of the journal is at  $O$  and the center of the bearing at  $O'$ . The distance between these centers is the *eccentricity* and is denoted by  $e$ . The *minimum film thickness* is designated by  $h_0$ , and it occurs at the line of centers. The film thickness at any other point is designated by  $h$ . We also define an *eccentricity ratio*  $\epsilon$  as

$$\epsilon = \frac{e}{c}$$

The bearing shown in the figure is known as a partial bearing. If the radius of the bushing is the same as the radius of the journal, it is known as a fitted bearing. If the bushing encloses the journal, as indicated by the dashed lines, it becomes a full bearing. The angle  $\beta$  describes the angular length of a partial bearing. For example, a 120° partial bearing has the angle  $\beta$  equal to 120°.

## Podmazivanje i materijali

[Steinhilper 2 (2008), str. 55]

**Tabelle 10.13. Vergleich der Eigenschaften von natürlichen und synthetischen Basisölen für Schmierstoffe in Anlehnung an [MöNa02]**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
<b>Viskositäts-Temperatur-Verhalten</b> (Viskositäts-Index (VI))	-	+	+ -	+	+	+ -	--	--	++	++	-
<b>Tief-Temperaturverhalten</b> (Stockpunkt)	--	+ -	++	++	+	+ -	--	-	++	+	+ -
<b>Oxidationsbeständigkeit</b> (Alterungstest)	-	--	+	+ -	+	--	+	+ -	+	+	++
<b>thermische Beständigkeit</b> (Erwärmen unter Luftabschluss)	-	-	-	+ -	+	+ -	++	-	+	+ -	+
<b>Flüchtigkeit</b> (Verdampfungsverlust)	-	+ -	+ -	++	++	+ -	+ -	+	+	+ -	+ -
<b>Lackverträglichkeit</b> (Einwirkung auf Anstriche)	++	-	++	-	-	-	-	--	+ -	-	+ -
<b>Wasserbeständigkeit</b> (Hydrolysetest)	++	--	++	-	-	+ -	++	-	+ -	-	+
<b>Rostschutzeigenschaften</b> (Korrosionstest)	++	++	++	-	-	+ -	-	-	+ -	--	+
<b>Dichtungsverträglichkeit</b> (Quellverhalten)	+ -	-	++	-	-	+ -	+ -	--	+ -	+ -	-
<b>Feuerresistenz</b> (Entzündungstemperatur)	--	--	--	-	-	-	-	++	+ -	-	++
<b>Löslichkeit von Additiven</b> (Aufnahme größerer Konzentrationen)	++	+ -	+	--	+ -	-	+	+ -	--	+ -	-
<b>Schmierfähigkeit</b> (Lastaufnahmevermögen)	+ -	++	+ -	+	+	+ -	++	++	--	-	++
<b>biologische Abbaubarkeit</b> (Abbautest)	-	++	+ -	++	++	++	--	+	--	-	--
<b>Toxizität</b>	+ -	++	++	+ -	+ -	+	+ -	--	++	-	+
<b>Mischbarkeit mit Mineralöl</b> (Bildung einer homogenen Phase)	++	++	++	+	+	--	+ -	-	--	-	--
<b>Preisrelation zu Mineralöl</b>	1	3	4	7	8	8	350	7	65	25	350
<b>Bewertungstabelle:</b>	A = Mineralöl (Solvent Neutral)			G = Polyphenylether							
1 ++	B = Rapsöl			H = Phosphorsäureester							
2 +	C = Polyalphaolefin			I = Siliconöl							
3 + -	D = Dicarbonsäureester			J = Silikatester							
4 -	E = Neopentylolster			K = Fluor-Chlor-Kohlenstoffol (Chlortrifluorethylenöl)							
5 --	F = Polyalkylenglykol (Polyglykol)										

[Steinhilper 2 (2008), str. 55]

Tabelle 10.14. Einsatzbeispiele der wichtigsten synthetischen Schmierstoffe in Anlehnung an [NiWiHö01]

Produktgruppe	Einsatzbeispiele
Polyalphaolefine (synthetische Kohlenwasserstoffe)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Hochleistungsöle für Dieselmotoren</li> <li>– Mehrbereichmotorenöle</li> <li>– Getriebeschmierung bei hoher thermischer Beanspruchung</li> <li>– Kompressoröle</li> </ul>
Dicarbonsäureester	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Flugmotorenöle</li> <li>– Leichtlaufmotorenöle</li> <li>– Grundöl für Hoch- und Tieftemperaturfette</li> <li>– Anwendungen, in denen eine sehr gute und schnelle biologische Abbaubarkeit verlangt wird</li> </ul>
Neopentylöster	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Anwendung ähnlich wie bei Dicarbonsäureester, aber besonders dort, wo höhere Oxidationsbeständigkeit und besser Löslichkeit von Additiven gefordert wird</li> </ul>
Polyalkylenglykole (Polyglykole)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Metallbearbeitungsflüssigkeiten</li> <li>– Getriebeöle (Schneckengetriebe)</li> <li>– Hydraulikfluide (schwer entflammbar)</li> <li>– Schmierstoff für Kompressoren und Pumpen</li> </ul>
Polyphenylether	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Hochtemperaturschmierstoffe (bis 400°C)</li> <li>– Anwendungen, wo Resistenz gegen ionisierende Strahlung (<math>\gamma</math>-Strahlen und thermische Neutronen) gefordert wird</li> </ul>
Phosphorsäureester	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Weichmacher</li> <li>– Feuerresistente Hydrauliköle</li> <li>– Sicherheitsschmierstoffe für Luft- und Gaskompressoren</li> <li>– EP-Wirkstoff</li> </ul>
Silikonöle	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Sonderschmierstoffe für hohe Temperaturen</li> <li>– Grundöl für Lifetime-Schmierfette (z.B. für Ausrücklager von Kfz-Kupplungen, Anlasser, Bremsen- und Achsbauteile)</li> </ul>
Produktgruppe	Einsatzbeispiele
Silikatester	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Hydrauliköle für tiefere Temperaturen</li> <li>– Wärmeübertragungsflüssigkeiten</li> </ul>
Fluor-Chlor-Kohlenstofföle	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Schmierstoffe für Sauerstoffkompressoren und für Pumpen für aggressive Flüssigkeiten</li> </ul>

[Steinhilper 2 (2008), str. 55]

Tabelle 10.15. Wirkstoffe (Additive), typische Wirkstoffarten, Verwendungszwecke und Wirkmechanismen nach [Bar94]

Wirkstoff	Wirkstoffarten	Verwendungszweck	Wirkungsmechanismus
Verschleißschutzwerkstoffe (Anti Wear (AW)-Additive)	Zinkdialkyldithiophosphate, Trikresylphosphate	Herabsetzung übermäßigen Verschleißes zwischen Metalloberflächen	Durch Reaktion mit Metalloberflächen entstehen Schichten, die plastisch deformiert werden und das Tragbild verbessern
Fresschutzwerkstoffe (Extreme Pressure (EP)-Additive)	geschwefelte Fette und Olefine, Chlorkohlenwasserstoffe, Bleisalze organischer Säuren, Aminophosphate	Verhütung von Mikroverschweißungen zwischen Metalloberfläche bei hohen Drücken und Temperaturen	Durch Reaktion mit Metalloberflächen entstehen neue Verbindungen mit niedrigerer Scherfestigkeit als das Grundmetall. Ständiges Abscheren und Neubilden
Reibungsveränderer (Friction Modifier)	Fettsäuren, gefetete Amine, Festschmierstoffe	Verringerung der Reibung zwischen Metalloberflächen	Hochpolare Moleküle werden auf Metalloberflächen adsorbiert und trennen die Oberflächen. Festschmierstoffe bilden reibungssenkenden Oberflächenfilm.
Viskositäts-Index-Verbesserer	Polyisobutylene, Polymethacrylate, Polyacrylate, Äthylen-Propylen, Styrol-Maleinsäureester-Copolymere, hydrogenierte Styrol-Butadien-Copolymere	Minderung der Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur	Polymermoleküle sind im kalten Öl (schlechteres Lösungsmittel) stark verknäult und nehmen im warmen Öl (gutes Lösungsmittel) durch Entknäuelung ein größeres Volumen ein. Dadurch ergibt sich eine relative Eindickung des Öls.
Pourpoint-Erniedriger	paraffin-alkylierte Naphthalene und Phenole, Polymethacrylate	Herabsetzung des Pourpoints des Öls	Verhindern der Agglomeration der Paraffinkristalle durch Umhüllung
Detergent-Wirkstoffe	normale oder basische Calcium-, Barium- oder Magnesium-Sulfonate, -Phenate oder -Phosphonate	Verringerung oder Verhütung von Ablagerungen in Motoren bei hohen Betriebstemperaturen	Steuerung der Entstehung von Lack und Schlamm durch Reaktion mit den Oxidationsprodukten, wobei öllösliche oder im Öl suspendierte Produkte entstehen.
Dispersant-Wirkstoffe	Polymere, wie stickstoffhaltige Polymethacrylate, Alkylsuccinimide und Succinatester, hochmolekulargewichtige Amine und Amide	Vermeidung oder Verzögerung der Entstehung und Ablagerung von Schlamm bei niedrigen Betriebstemperaturen	Dispersantien besitzen ausgeprägte Affinität zu Verunreinigungen und umhüllen diese mit öllöslichen Molekülen, welche die Agglomeration und Ablagerung des Schlammes im Motor unterbinden.
Oxidationsinhibitoren	gehinderte Phenole, Amine, organische Sulfide, Zinkdithiophosphate	Bildung von harz-, lack-, schlamm-, säure- und polymerartigen Verbindungen minimieren	Beendigung von Oxidationskettenreaktionen durch Verringerung der organischen Peroxide. Herabsetzung der Saurebildung durch verringerte Sauerstoffaufnahme durch das Öl. Verhindern von katalytischen Reaktionen
Korrosionsinhibitoren	Zinkdithiophosphate, geschwefelte Terpene, phosphorierte, geschwefelte Terpene, geschwefelte Olefine	Schutz von Lager- und anderen Metalloberflächen gegen Korrosion	Wirkung als Antikatalysatoren; Filmbildung auf Metalloberflächen als Schutz gegen Angriff durch Säuren und Peroxide.
Rostinhibitoren	Aminphosphate, Natrium-, Calcium- und Magnesiumsulfate, Alkyl-Succinsäuren, Fettsäuren	Schutz von eisenhaltigen Metallflächen gegen Rost	Polare Moleküle werden bevorzugt auf Metalloberflächen adsorbiert und dienen als Barriere gegen Wasser. Neutralisation von Säuren
Metalldeaktivatoren	Triarylphosphite, Schwefelverbindungen, Diamine, Dimerkaptan-Thiadiazol-Derivate	Unterbindung des katalytischen Einflusses auf Oxidation und Korrosion	Auf Metallflächen wird ein Schutzfilm adsorbiert, der den Kontakt zwischen dem Grundmetall und den korrosiven Substanzen unterbindet.
Schauminhibitoren	Silikonpolymere, Tributylphosphat	Verhüten der Entstehung stabiler Schäume	durch Angriff auf den jede Luftblase umgebenden Ölfilm Verringerung der Grenzflächenspannung; dadurch Zusammenfluss kleinerer Blasen zu größeren Blasen, die zur Oberfläche aufsteigen
Haftverbesserer	Seifen, Polyisobutylene und Polyacrylat-Polymere	Erhöhung des Haftvermögens des Öls	Erhöhung der Viskosität; Wirkstoffe sind zäh und klebrig
Emulgatoren	Natriumsalze der Sulfonsäure und andere organische Säuren, gefetete Aminsalze	Emulgieren von Öl in Wasser	durch Adsorption des Emulgators in der Öl/Wasser-Grenzfläche Herabsetzung der Grenzflächenspannung; dadurch Dispergieren einer Flüssigkeit in einer anderen
Demulgatoren	anionische Sulfonsäureverbindungen (Dinonylnaphthalinsulfonat)	Demulgieren von Wasser	Ausbildung einer Grenzschicht zwischen Wasser und Öl aus grenzflächenaktiven Stoffen
Bakterizide	Phenole, Chlorverbindungen, Formaldehyd-Derivate	Erhöhung der Emulsionsgedauere, Vermeidung unangenehmer Gerüche	Verhütung oder Verzögerung des Wachstums von Mikroorganismen

[Steinhilper 2 (2008), str. 61]

Tabelle 10.16. Gebrauchseigenschaften von Schmierfetten auf Mineralölbasis [MöNa02]

	Natrium	Lithium	Calcium	Calcium-Komplex	Bentonit
Eindickerform	Faser	Faser	Faser	Faser	Plättchen
Faserlänge [ $\mu\text{m}$ ]	100	25	1	1	0,5
Faserdurchmesser [ $\mu\text{m}$ ]	1	0,2	0,1	0,1	0,1
Kurzbezeichnung	langfaserig	mittelfaserig	kurzfaserig	kurzfaserig	kurzfaserig
<i>Eigenschaften</i>					
Tropfpunkt [ $^{\circ}\text{C}$ ]	150...200	170...220	80...100	250...300	rd. 300
Einsatztemperatur					
obere [ $^{\circ}\text{C}$ ]	+100	+130	+50	+130	+150
untere [ $^{\circ}\text{C}$ ]	-20	-20	-20	-20	-20
Wasserbeständigkeit	unbeständig	gut	sehr gut	sehr gut	gut
Walkbeständigkeit <sup>1)</sup> [0,1mm]	60...100	30...60	30...60	< 30	30...60
Korrosionsschutz <sup>2)</sup>	gut	sehr schlecht	schlecht	schlecht	gut
<i>Einsatz</i>					
Eignung für Wälzlager	gut	sehr gut	bedingt	bedingt	sehr gut
Eignung für Gleitlager	gut	gut	bedingt	---	---
Hauptverwendung	Getriebe- fließfett	Mehrzweck- fett	---	Mehrzweck- fett	Hochtempe- raturfett
Preis	mittel	hoch	niedrig	sehr hoch	sehr hoch

<sup>1)</sup> Differenz der Penetration nach 60 und 100 000 Doppelhüben

<sup>2)</sup> kann durch Wirkstoffe deutlich verbessert werden

[Steinhilper 2 (2008), str. 62]

Tabelle 10.17. Einsatzbereiche von synthetischen Schmierfetten [MöNa02]

	Mineralöl (als Vergleich)	PAO	Esteröl	Silikonöl	Alkoxifluoröl
Obere Einsatzgrenze [ $^{\circ}\text{C}$ ]	150	200	200	250	250
Untere Einsatzgrenze [ $^{\circ}\text{C}$ ]	-40	-70	-70	-75	-30
Schmierung von Metallen	++	++	+++	---	-
Schmierung von Kunststoff	o	++	o	+++	+++
Hydrolysebeständigkeit	++	++	o	+++	+++
Beständigkeit gegen Chemikalien	+	+	--	++	+++
Elastomerverträglichkeit	o	+	o	+++	+++
Toxizität	-	+	+	+++	+++
Brennbarkeit	---	---	+	++	+++
Strahlenbeständigkeit	--	--	-	+	++

+++ ausgezeichnet ++ sehr gut + gut o mäßig - ausreichend -- bedingt --- ungünstig

Tabelle 10.18. Verträglichkeit von Schmierfetttypen [MöNa02]

Fetttyp	Na	Li	Ca	Ca-Komplex	Ba-Komplex	Al-Komplex	Bentonit
Na-Fett	-	-	-	-	+	-	-
Li-Fett	-	-	+	+	+	-	-
Ca-Fett	-	+	+	-	+	-	-
Ca-Komplex	-	+	+	-	+	-	-
Ba-Komplex	+	+	+	+	-	+	-
Al-Komplex	-	-	-	-	+	-	-
Bentonit	-	-	-	-	-	-	-

+ verträglich - unverträglich

[Steinhilper 2 (2008), str. 72]

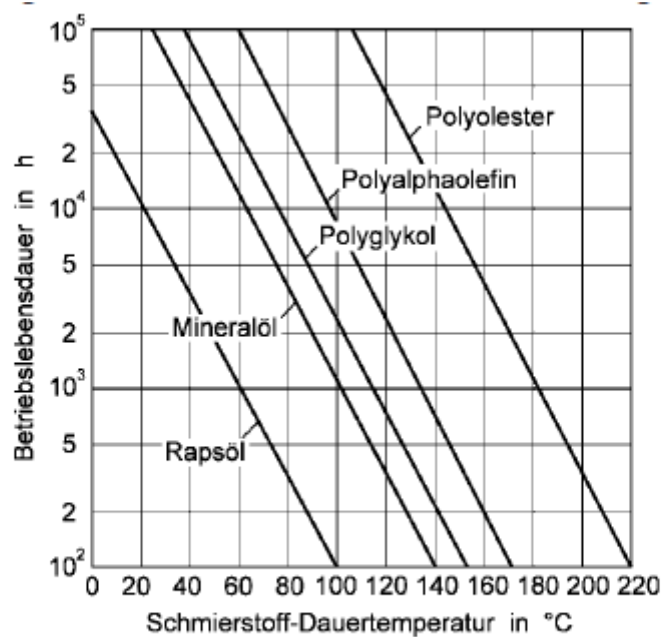


Abb. 10.28. Einfluss der Schmierstoff-Dauertemperatur auf die ungefähre Lebensdauer von mineralölbasischen und synthetischen Schmierstoffen in Anlehnung an [NiWiHö01]

### 1.4.3 Maziva

**Mazivo** – sredstvo namijenjeno prije svega podmazivanju – primarni su zadaci maziva smanjenje trenja i trošenja. Mazivo često ispunjava i sekundarne zadatke:

- hlađenje,
- zaštita od korozije,
- brtvljenje,
- održavanje čistoće,
- smanjenje buke.

Ne postoji idealno mazivo koje bi ispunjavalo sve zadatke koje nameću suvremeni strojarški sustavi, te se koristi široka lepeza maziva, različitih po vrstama i karakteristikama.

Maziva se mogu klasificirati po više osnova – agregatnom stanju, porijeklu, sastavu, namjeni, karakteristikama.

Agregatno stanje	Porijeklo i sastav	
plinovito ( <i>pod tlakom</i> )	zrak inertni plinovi	
tekuće – maziva ulja	prirodna – biljna životinjska mineralna – prerada nafte	sintetska zamašćena ⇒ mineralna + prirodna legirana ⇒ mineralna + sintetska
polukruto – mazive masti	prirodna mineralna ⇒ mineralna ulja + sapuni	

	sintetska
kruto ( <i>suspenzije u ulju</i> )	grafit molibden-disulfid

### Maziva ulja

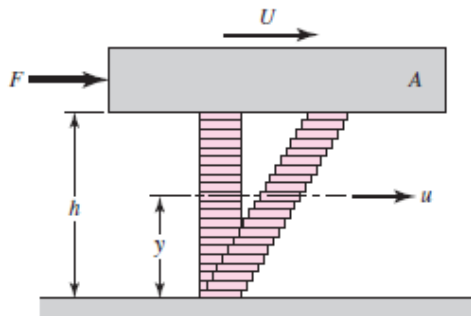
tekuće – maziva ulja	prirodna – biljna životinjska mineralna – prerada nafte	sintetska zamašćena ⇒ mineralna + prirodna legirana ⇒ mineralna + sintetska
-------------------------	---	---

Tri su osnovne karakteristike mazivih ulja:

1. **Viskoznost** (*dinamička*),  $\eta$ ,  $\text{m}\cdot\text{Pa}\cdot\text{s}$ . – otpor ulja tečenju. Uobičajeni je pokazatelj viskoznosti i SAE gradacija (*s porastom broja gradacije opada  $\eta$  ulja*).

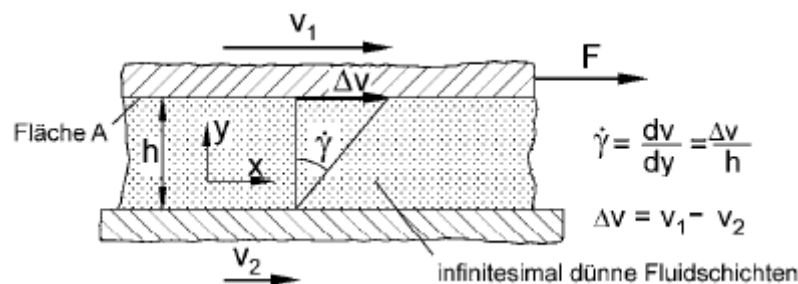
In Fig. 12–1 let plate *A* be moving with a velocity *U* on a film of lubricant of thickness *h*. We imagine the film as composed of a series of horizontal layers and the force *F* causing these layers to deform or slide on one another just like a deck of cards. The layers in contact with the moving plate are assumed to have a velocity *U*; those in contact with the stationary surface are assumed to have a zero velocity. Intermediate layers have velocities that depend upon their distances *y* from the stationary surface. Newton’s viscous effect states that the shear stress in the fluid is proportional to the rate of change of velocity with respect to *y*. Thus

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy}$$



[Budynas (2011) str. 619]

[Steinhilper 2 (2008), str. 64]



where  $\mu$  is the constant of proportionality and defines *absolute viscosity*, also called *dynamic viscosity*. The derivative  $du/dy$  is the rate of change of velocity with distance



and may be called the rate of shear, or the velocity gradient. The viscosity  $\mu$  is thus a measure of the internal frictional resistance of the fluid. For most lubricating fluids, the rate of shear is constant, and  $du/dy = U/h$ . Thus, from Eq. (12-1),

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{U}{h} \quad \eta = \frac{F/A}{dv/dy} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

Fluids exhibiting this characteristic are said to be *Newtonian fluids*. The unit of viscosity in the ips system is seen to be the pound-force-second per square inch; this is the same as stress or pressure multiplied by time. The ips unit is called the *reyn*, in honor of Sir Osborne Reynolds.

The absolute viscosity is measured by the pascal-second ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ) in SI; this is the same as a Newton-second per square meter. The conversion from ips units to SI is the same as for stress. For example, multiply the absolute viscosity in reyns by 6890 to convert to units of  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ .

## 2. Indeks viskoznosti, IV, – otpor ulja smanjivanju $\eta$ s porastom temperature,

[Steinhilper 2 (2008), str. 67]

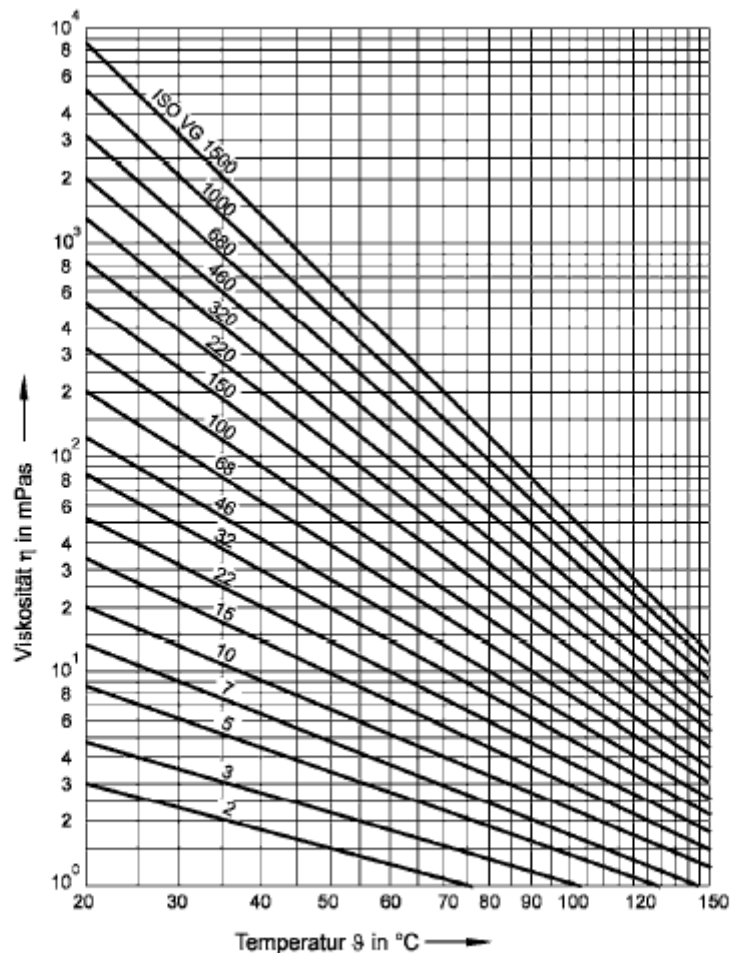


Abb. 10.25. Abhängigkeit der dynamischen Viskosität  $\eta$  von der Temperatur  $\theta$  bei der Dichte  $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$  nach ISO

3. **Tecište**,  $t$ , °C – temperatura ispod koje se ulje skrućuje.

Mineralöle werden durch fraktionierte Destillation aus dem Rohöl abgetrennt und sind Mischungen aus linearen oder verzweigten Alkanen (Paraffinbasisöl) oder ringförmigen Cyclo-Alkanen (Naphthenbasisöl). Durch Raffination entstehen unlegierte Öle für einfache Beanspruchungen (Tabelle 5). Mit Zusätzen (Tabelle 6) sind sie für besondere Anforderungen geeignet ( z.B. Motorenöle).

Prema normi DIN 51502 mazivo ulje spada u prvu grupu pogonskih materijala (*zajedno sa specijalnim uljima, teško zapaljivim hidrauličkim tekućinama sintetiziranim ili polusintetiziranim tekućinama*) koriste se oznake navedene u **T-01.XX**. [Böge (2007), str. 461] [Böge (2011), str. E71]

**Tabela 01.XX** Oznake mineralnih ulja DIN 51502

Pogonski materijal	Oznaka	Norma
Normalschmieröle	AN	DIN 51501/79
Umlaufschmieröle	C	DIN 51517/04
Gleitbahnöle	CG	
Druckluftöle	D	
Luftfilteröle	F	
Formen-Trennöle	FS	
Hydrauliköle (HL, HLP)	H	DIN 51524-
Hydrauliköle (HVLP)	HV	1/2/89
Motoren-Schmieröle)	HD	DIN 51524-3/90
Schmieröle für Kfz.-Getriebe)	HYP	
Isolieröle elektrisch	J	
Kältemaschinenöle	K	
Härte- und Vergüteöle	L	DIN 51503-1/97
Wärmeträgeröle	Q	
Korrosionsschutzöle	R	DIN 51522/98
Kühlschmierstoffe	S	
Schmier- und Regleröle	TD	DIN 51385/91
Luftverdichteröle (VB, VC)	V	DIN 51515-1/01
Walzöle	W	DIN 51506/85

Stoffart (Anwendung)	Kenn- buchstabe(n)	Normen Symbol
<b>Stoffgruppe 2:</b> Schwer entflammbare Hydraulikflüssigkeiten für Bergbau, Walzwerke, Flugzeuge		
Öl-in-Wasser-Emulsionen	HFA	DIN 24320
Wasser-in-Öl-Emulsionen	HFB	
Wässrige Polymerlösungen	HFC	
Wasserfreie Flüssigkeiten	HFD	
<b>Stoffgruppe 3:</b> Synthese- oder Teilsyntheseflüssigkeiten, biologisch abbaubar, für Anlagen der Nahrungsmittelindustrie, Baumaschinen		
Ester, organisch	E	
Perfluor-Flüssigkeiten	FK	
Synthet. Kohlenwasserstoffe	HC	
Ester der Phosphorsäure	PH	
Polyglykole	PG	
Silikonöle	SI	
sonstige	X	

**Tabelle 6.** Kennzahlen für die Viskosität (fett) nach DIN 51519. (Viskositäten sind ca.-Werte)

ISO- Viskositätsklasse	Kinem. Visk. mm <sup>2</sup> /s		Dyn. V. mPa s
	40	50° C	40° C
ISO VG 2	2,2	1,3	2,0
ISO VG 3	3,2	2,7	2,9
ISO VG 5	4,6	3,7	4,1
ISO VG 7	6,8	5,2	6,2
ISO VG 10	10	7	9,1
ISO VG 15	15	11	13,5
ISO VG 22	22	15	18
ISO VG 32	32	20	29
ISO VG 46	46	30	42
ISO VG 68	68	40	61
ISO VG 100	100	60	90
ISO VG 150	150	90	135
ISO VG 220	220	130	200
ISO VG 320	320	180	290
ISO VG 460	460	250	415
ISO VG 680	680	360	620
ISO VG 1000	1000	510	900
ISO VG 1500	1500	740	1350

**Tabelle 7.** Zusatz-Kennbuchstaben für Schmierstoffe (ausgenommen sind Motorschmieröle, Schmieröle für Kfz.-Getriebe und schwer entflammbare Hydraulikflüssigkeiten).

Schmierstoffart	Zusatz-Kennbuchstaben
Schmieröle mit detergierenden Zusätzen, z.B. Hydrauliköl HLPD	<b>D</b>
Schmieröle, die in Mischung mit Wasser verwendet werden, z.B. Kühlschmierstoff SE	<b>E</b>
Schmierstoffe mit Wirkstoffen zum Erhöhen des Korrosionsschutzes und/oder der Alterungsbeständigkeit, z.B. Schmieröl DIN 51517 - CL-100	<b>L</b>
Schmierstoffe mit Festschmierstoff-Zusatz (z.B. Graphit, Mo-Disulfid) z.B. Schmieröl CLPF	<b>F</b>
Wassermischbare Kühlschmierstoffe mit Mineralölan-teilen, z.B. Kühlschmierstoff SEM	<b>M</b>
Wassermischbare Kühlschmierstoffe auf synthetischer Basis, z.B. Kühlschmierstoff SES	<b>S</b>
Schmierstoffe mit Wirkstoffen zum Herabsetzen von Reibung und Verschleiß im Mischreibungsbereich und/oder zur Erhöhung der Belastbarkeit, z.B. Schmieröl DIN 51517 - CLP-100	<b>P</b>
Schmierstoffe, die mit Lösungsmitteln verdünnt sind, z.B. Schmieröl DIN 51513 - BB-V <sup>1)</sup>	<b>V</b>

<sup>1)</sup> Kennzeichnung nach der Verordnung über gefährliche Stoffe (Gef-StoffV).

■ **Beispiel:** Kennzeichnung eines Öles

<b>CL</b> <b>68</b>	Kasten: Mineralöl C Schmieröl C, Stoffgruppe 1; L Korrosionsbeständigkeit (Tabelle 7); 68 Viskositätskennzahl (Tabelle 6)
------------------------	--

[Steinhilper 2 (2008), str. 74]

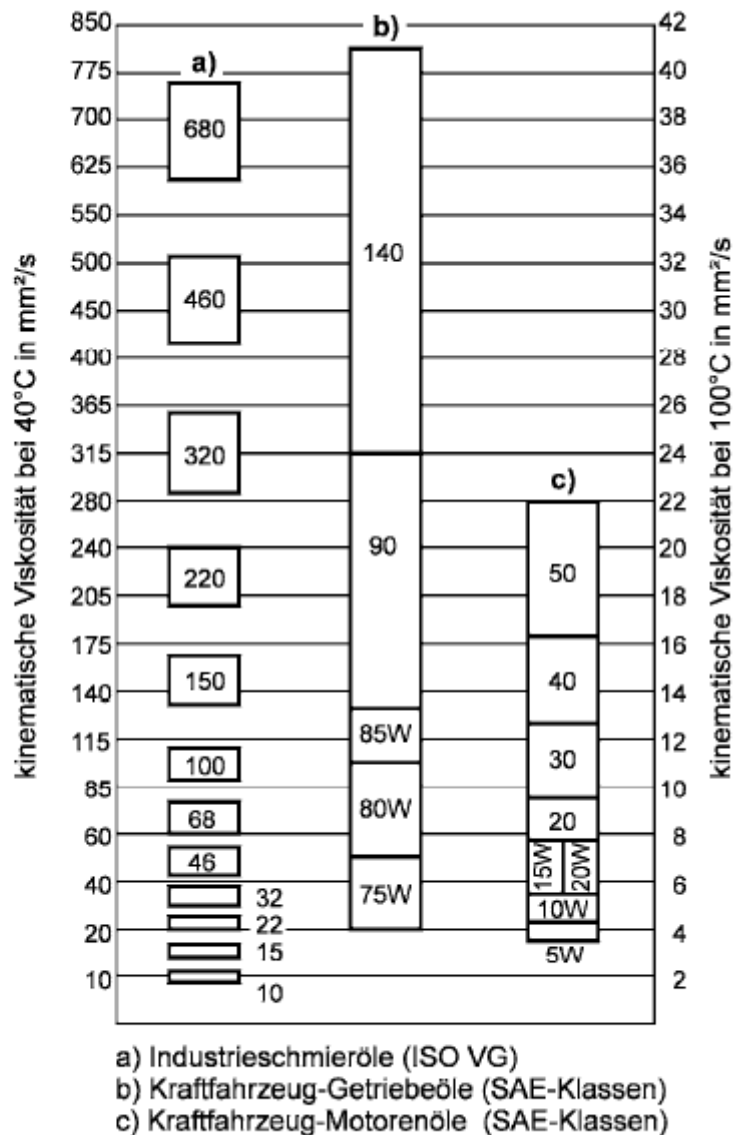


Abb. 10.29. Viskositäts-Klassifikationen nach ISO und SAE [GfT5]

<http://www.ina.hr/default.aspx>

<http://www.shell.com/home/content/lubes/>

Primjeri su mazivih ulja iz proizvodni program INA-e:

- Sintetsko motorno mazivo ulje za osobna vozila "INA Millennium SAE 5W-40"  
 $\eta = 3500$  (25 °C) m·Pa·s ( $\nu = 14,5$  (100 °C) mm<sup>2</sup>/s)      IV = 165       $t_b = -45$  °C
- Mineralno motorno mazivo ulje za osobna vozila "INA Delta 5 SAE 15W-40"  
 $\eta = 3500$  (15 °C) m·Pa·s ( $\nu = 14,5$  (100 °C) mm<sup>2</sup>/s)      IV = 150       $t_b = -30$  °C
- Polusintetsko mjenjačko mazivo ulje "INA Umol ZC SAE 75W-90"  
 $\nu = 120$  (40 °C) mm<sup>2</sup>/s      IV = 130       $t_b = -40$  °C

## Mazive masti

[Czichos2010/440]

polukruto – mazive masti	prirodna mineralna ⇒ mineralna ulja + sapuni sintetska
-----------------------------	--

**Podmazivanje mastima** nisko opterećenih, sporednih ležaja i zglobova, te za prašnu okolinu, jednostavno je i jeftino. Suvišna mast ne kaplje s ležajnih mjesta, već izlazi iz ležaja kao vijenac koji štiti od onečišćenja. Mast se mora odgovarajućim uređajima tlačiti do ležajnih mjesta. Prekomjerno zagrijavanje ležaja dovest će do topljenja cijelokupne masti i do pražnjenja spremnika, a time i do zapaljenja ležaja.

Dvije su osnovne karakteristike mazivih masti:

1. **Konzistentnost** – otpor masti prodiranju krutog tijela. Uobičajeni je pokazatelj konzistentnosti NLGI broj (*s porastom broja raste konzistentnost masti*).
2. **Kapljište**,  $t_k$ , °C – temperatura iznad koje se iz masti izdvaja ulje.

Fette sind durch Verseifung verdickte Öle (Naphtenbasis = Ringverbindungen) Seifen sind Salze der Metalle Na, Ca, Li (auch Kombinationen) mit langkettigen Fettsäuren. Der Viskosität entspricht die Konsistenzkennzahl, ermittelt mit der Konuspenetration (DIN ISO 2137). Zähes Fett lässt einen genormten Kegel weniger eindringen als dünnflüssigeres. [Böge (2007), str. 462] [Böge (2011), str. E71]

**Tabelle 10 (4 Teile).** Kennzeichnung von Schmierfetten DIN 51502

1	Schmierfett für	Kenn-Buchst.
	Wälz- und Gleitlager, Gleitflächen DIN 51825	<b>K</b>
	geschlossene Getriebe DIN 51826	<b>G</b>
	Offene Verzahnungen (Haftschmierstoffe)	<b>OG</b>
	Für Gleitlager und Dichtungen	<b>M</b>
	Schmierfette auf Synthesebasis	<b>Tab. 5/Stoffgr. 3</b>

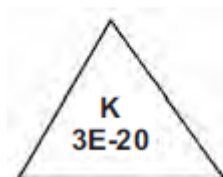
2 Konsistenzklasse	
Walkpenetration in 0,1 mm -	Kenn- zahl
445...475	000
400...430	00
355...385	0
310...340	1
265...295	2
220...250	3
175...205	4
130...160	5
85...115	6

3 Zusatzkennbuchstaben					
$T_{max}$ in °C 1)	Verhalten gegen Wasser		$T_{max}$ in °C	Verhalten gegen Wasser	
60	0 oder 1	<b>C</b>	140	Nach Verein- barung	<b>N</b>
	2 oder 3	<b>D</b>	160		<b>P</b>
80	0 oder 1	<b>E</b>	180		<b>R</b>
	2 oder 3	<b>F</b>	200		<b>S</b>
100	0 oder 1	<b>G</b>	220		<b>T</b>
	2 oder 3	<b>H</b>	>220		<b>U</b>
120	0 oder 1	<b>K</b>	0 keine, 1 geringe, 2 mäßige, 3 starke Veränderung		
	2 oder 3	<b>M</b>			

4 Gebrauchstemperatur	
$T_{min}$ in °C	Kennzahl
- 10	- 10
- 20	- 20
- 30	- 30
- 40	- 40
- 50	- 50
- 60	- 60

■ **Beispiel:**

Kennzeichnung eines Fettes mit Mineralölbasis

**Dreieck:**

Mineralölbasis ; K für Wälzlager (Tabelle 10.1)

3: Konsistenzklasse 3 (Tabelle 10.2);

E: obere Gebrauchstemp. bis 80° C (Tabelle 10.3),

-20: untere Gebrauchstemperatur (Tabelle 10.4).

[Steinhilper 2 (2008), str. 73]

**Tabelle 10.20.** NLGI-Konsistenzklassen und Anwendung von Schmierfetten in Anlehnung an [CziHa03]

NLGI-Klasse	Penetration 0,1mm	Konsistenz	Gleitlager	Wälzlager	Zentralschmier- anlagen	Getriebe	Wasser- pumpen	Block- fette
000	445 bis 475	fast flüssig			+	+		
00	400 bis 430	halbflüssig			+	+		
0	355 bis 385	besonders weich			+	+		
1	310 bis 340	sehr weich			+	+		
2	265 bis 295	weich	+	+				
3	220 bis 250	mittel	+	+				
4	175 bis 205	ziemlich fest		+			+	
5	130 bis 160	fest					+	
6	85 bis 115	sehr fest						+

+ hauptsächliche Einsatzgebiete

<http://www.ina.hr/default.aspx><http://www.shell.com/home/content/lubes/>

Primjeri su mazivih masti iz proizvodnog programa INA-e:

- Višenamjenska mineralna/litijeva mast za valjne/klizne ležajeve "INA LIS 1"

NLGI 1

 $t_k = -180\text{ °C}$ 

- Višenamjenska mineralna/kalcijeva mast za valjne/klizne ležajeve "INA EKS HD 1"

NLGI 1

 $t_k = -85\text{ °C}$ **Kruta maziva**

**Festschmierstoffe** sind durch ihre Kristallstruktur in der Lage, in dünnsten Schichten abzuscheren. Dabei bleiben kleinste Partikel in den Rauheitsmulden zurück, wo sie die Oberflächen glätten und Mikrokontakte verhindern. Voraussetzung ist genügend kleine Partikelgröße (0,1 ... 1 m). Festschmierstoffe werden eingesetzt bei hohen Temperaturen oder bei Forderung nach Ölfreiheit. Ihre Struktur ist ähnlich: Molekülgitter mit starken Kräften (kleine Abstände) innerhalb der netzartigen Moleküle und schwache Kräfte (größere Abstände) zwischen ihnen. *Anwendung* für Gleitlager mit niedrigen Gleitgeschwindigkeiten, oszillierenden Bewegungen im Mischreibungsbereich, bei Forderung nach Ölfreiheit und bei hohen Temperaturen, wie Schraubenverbindungen an Auspuffanlagen, Rohrleitungsflanschen, Bestandteil von Verbundwerkstoffen für Gleitfunktionen.



Anwendungsformen sind Pasten, Sprays, und Einlagerungen in Sinterwerkstoffe. [Böge (2007), str. 462] [Böge (2011), str. E71]

Tabelle 9. Festschmierstoffe, Eigenschaften und Anwendung

Stoff	Beschreibung	Anwendung
Talkum	Magnesiumsilikat, weißes Mineral, fettiger Griff	Pulver, Gleit- und Trennmittel für Reifendecke/ Schlauch, in Kabeln, Schneidkraide
Graphit	Reiner Kohlenstoff, schwarzes Mineral, höhere Wärmeleitfähigkeit und Temperaturbeständigkeit in Luft (550 °C) als MoS <sub>2</sub> , preisgünstiger	Pulver für Sicherheitschlösser, Pasten mit rückstandfrei verdampfenden Flüssigkeiten. Zusatz zu Fett und Öl, Bestandteil von Sinterwerkstoffen für Gleitzwecke (Stromabnehmerteile, Kolbenringe f. Gaskompressoren)
Bornitrid (hex. BN)	Wegen des Graphitglitters als weißer Graphit bezeichnet, in Luft stabil bis 1000 °C, in Inertgas bis 1800 °C	Beschichtung (coatings) mit Spray oder Pasten (Schlichte) von geotechnischen Geräten und Anlagen, die mit Al-, Mg-, Zn-, Pb-Schmelzen oder Schlacken Kontakt haben. Geringe Benetzung und Reibung zwischen Schmelze/Wand. Trennmittel beim Löten, Sintern, und Warmumformen
Molybdän-disulfid	Synthetische Verbindung MoS <sub>2</sub> , bleigraue Kristalle, höhere Druckfestigkeit (Dichte) und Beständigkeit im Vakuum (Pumpen) als Graphit, bis ca 400 °C beständig, Korngröße 0,1 ... 10 µm	Pulver und Pasten für Grundbehandlung von Gleitstellen, die nicht mehr nachgeschmiert werden können: Stopfbuchsenpackungen, Kreuzgelenke. Gleitlacke für Nabe-Welle-Verbindung zur Verhütung von Reiboxidation (Passungsrost). Bestandteil von Sinterwerkstoffen für Gleitzwecke (in Verbindung mit PTFE (Teflon) und hex. BN

#### 1.4.4 Izbor maziva

[Neale1995, s. 294]

Izbor maziva je zadatak proizvođača sustava koji daju garanciju.

Component or performance requirement	Grease	Oil
Removing heat	No	Yes. Amount depends on system
Keep out dirt	Yes. Forms own seal	No. But total loss systems can flush
Operate in any attitude	Yes. Check design of grease valves	No. Unless specially designed
Plain bearings	Limited (slow speed or light load)	Extensive
Rolling bearings	Extensive	Extensive
Sealed rolling bearings	Almost universal	No
Very low temperatures	No. Except for some special greases	Yes (check pour point of oil)
Very high temperatures	No. Except for some special greases	Yes. With correct system
Very high speeds	No. Except small rolling bearings	Yes
Very low or intermittent speeds	Yes	Hydrodynamic bearings--limited. Hydrostatic bearings--yes
Rubbing plain bearings	Yes	Yes. With limited feed

## 1.5 Oprema za podmazivanje

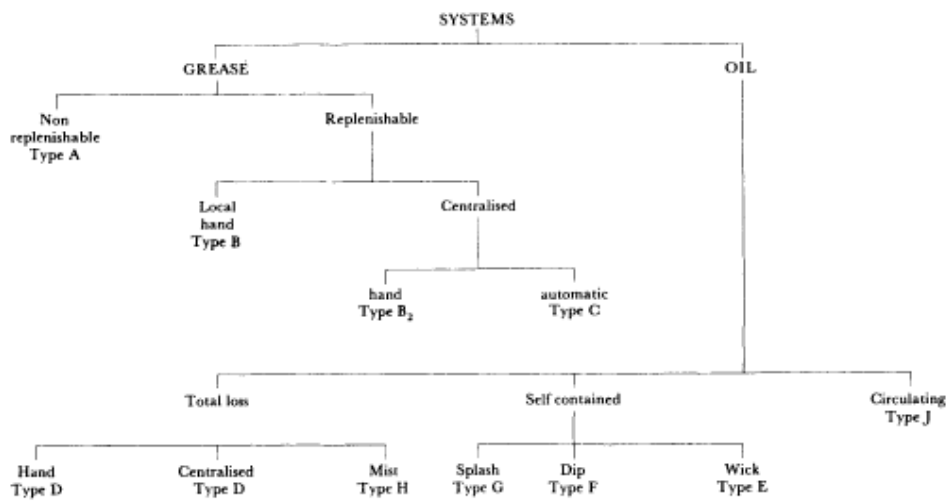
### 1.5.1 Sustavi za podmazivanje

[Neale1999/339]

For brevity and convenience the vast array of lubrication systems have been grouped under nine headings. These are each more fully discussed in other Sections of the Handbook.

Type	Title
A	Total loss grease
B	Hand greasing
C	Centralised greasing
D	Total loss oil
E	Wick/pad oil
F	Ring and disc oil
G	General mist and splash
H	Pressure mist
J	Circulating oil

neobnovljiva (A)      obnovljiva



[Neale1999/338]

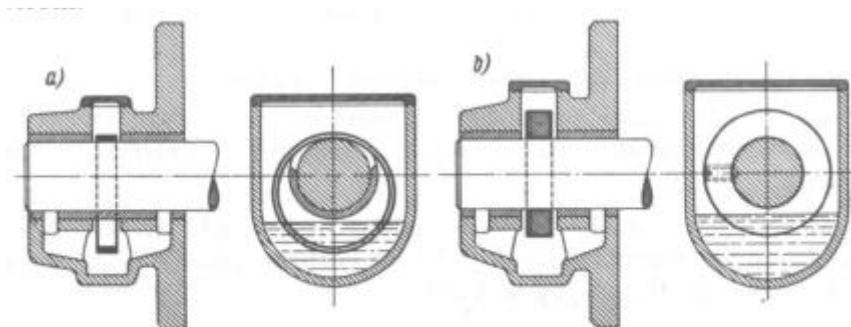
Type	Characteristics	Application	
T O T A L L O S S S E L F C O N T A I N E D	Hand Type D	Oil can	Simple bearings, Small numbers, low duty, easy access
	Centralised Type D	Intermittent feed	Small heat removal, difficult access, large numbers
	Mist Type H	Aerosol spray.	Rolling bearings, mechanisms
	Splash Type G	Lubrication by mist	Enclosed mechanisms, gearboxes
	Dip Type F	Ring or disc systems. Oil circulates	Plain bearings— slow or moderate duty
Wick Type E	Pad or wick feed from reservoir— total loss or limited circulation	Plain bearings, low duty. Light loaded mechanisms	
Circulating Type J	Oil from tank or sump fed by pressure pump to bearings or sprays	Almost all applications where cost is justified	

Type	Characteristics	Applications
Non replenishable Type A	Bearings packed on assembly. Refilling impossible without stripping	Rolling bearings, some plastic bushings
Local—hand Type B <sub>1</sub>	Grease nipple to each bearing	Small numbers, easy access, cheap
Centralised— hand Type B <sub>2</sub>	Feed pipes brought to manifold or pump	Reasonable numbers. Inaccessible bearings
Centralised— automatic Type C	Grease pump feed to bearing and sets of bearings from automatic pump	Large numbers, important bearings, great distances. Where frequent relubrication is required

### 1.5.2 Oprema za podmazivanje uljima

**Podmazivanje uljem** dolazi u obzir za sve brzohodne ležaje s velikim površinskim pritiscima i višim temperaturama. Za podredene svrhe, kao što je podmazivanje zglobova, jednostavnih i lako pristupačnih sporednih ležaja ili poljoprivrednih strojeva, zadovoljava *ručno podmazivanje*. Mazivo se dovodi do otvora za podmazivanje pomoću kantice za ulje ili brizgalice za ulje. Pri tome ležaj dobiva samo onoliko ulja koliko je potrebno da ne dođe do zagrijavanja. Da bi se mogla preuzeti dovoljna količina ulja, mora da je otvor za podmazivanje veći nego onaj za podmazivanje mastima (sl. 213). Zbog spriječavanja onečišćenja otvora za podmazivanje, preporučljivo ga je zatvarati maznom nazuvicom.

[Decker1987/199]



Slika 215. Podmazivanje prstenom za podmazivanje  
a) sa slobodnim prstenom DIN 322; b) sa čvrstim prstenom

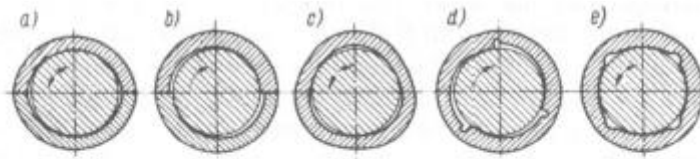
Automatski uređaji za podmazivanje opskrbljuju ležajna mjesta stalno uljem u ograničenoj količini kapljica (5 do 40 kapi/min). Slika 214 prikazuje mazalicu s fitiljom i otkapnu uljnu mazalicu. Danas se daje prednost malim pumpnim agregatima, koji opskrbljuju mnoga mjesta za podmazivanje i prema veličini ležaja i brzini vrtnje dopremaju 0,1 do 5 cm<sup>3</sup> ulja u minuti. Ulje nakon toga otječe u sabirnik.

Podmazivanje uranjanjem jednostavno je, sigurno i štedljivo. Dijelovi prijenosnika koji rotiraju (na primjer zupčanci) uranjaju se u uljnu kupelj i bacaju ulje na ležaje. Zbog unutarnjeg trenja smiju dijelovi prijenosnika uranjati samo malo (inače su veći gubitci energije i zagrijavanje). Za vodoravna vratila pokazalo se kao pouzdano podmazivanje maznim prstenom (sl. 215). U blazinici ili tuljku ležaja nalazi se prerez u kojemu visi slobodno na vratilu tanak mazni prsten DIN 322 (sl. 215a). Rukavac koji rotira nosi sa sobom prsten, a prsten na sebi transportira ulje iz komore za ulje prema gore. Podmazivanje maznim prstenom može se obavljati i čvrstim prstenom (sl. 215b).

Najsigurnije i najekonomičnije je **optočno (cirkulacijsko) podmazivanje**, koje udovoljava najvišim zahtjevima postavljenim na pogonsko važne ležaje. Sva mjesta za podmazivanje opskrbljuju se iz jedne uljne pumpe preko sistema cijevi. Ulje koje otječe filtrira se, u određenim slučajevima hladi, i sakuplja u zbirnike. Sakupljeno ulje ponovo se pumpa u sistem. Ulje koje cirkulira, istodobno hladi ležaje.

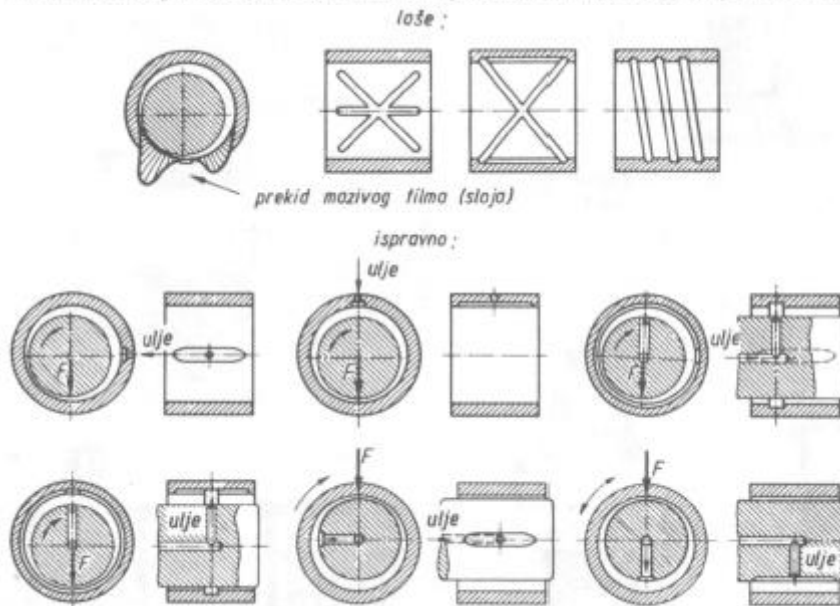
Ulje za podmazivanje dovodi se kroz provrte u kućištu ležaja do utora za podmazivanje ili do komora za podmazivanje, tako da se može raspodijeliti preko cijele širine ležaja (sl. 209). Na čeonj strani ležaja otječe ulje nakon podmazivanja u sabirnik. Odanle se ponovo dovodi do ležaja pomoću uljne crpke. Loše smješteni utori za razvođenje ulja (sl. 209 gore) mogu čak dovesti do prekida uljnog sloja i time znatno pogoršati podmazivanje. Nepovoljni su ili ukršteni ili u obliku zavojnice izrađeni utori za razvođenje maziva. *Utores za razvođenje maziva ne stavljati u tlačno područje!*

Na ležajima podmazivanim mašču, kod kojih se ne može računati s tekućim trenjem, preporučljivo je, naprotiv, utore za razvođenje maziva razmjestiti po čitavoj kliznoj površini, kako bi bili dovoljno snabdijevani mašču.



Slika 208. Klizni ležaj s više kliznih površina

a) ležaj s dvostrukom kliznom površinom i blazinicom kod koje zračnost ima oblik limuna; b) ležaj s dvostrukom kliznom površinom i međusobno zaokrenutim klinastim procjepima; c) ležaj s trostrukom kliznom površinom i neokrugla blazinica dobivena tlačenjem; d) ležaj s trostrukom kliznom površinom i utorom za razvođenje maziva; e) ležaj s četverostrukom kliznom površinom i komorom za podmazivanje



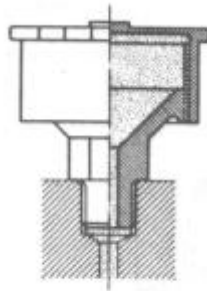
Slika 209. Pogrešan i ispravan položaj utora za razvođenje maziva pri tekućem trenju

Često se pitamo da li su bolji klizni ili valjni ležaji. Svaka vrst ležaja ima svoje specifične prednosti i nedostatke. Velika površina podmazivanja kliznih ležaja djeluje prigušujući na vibracije i šum, tako da klizni ležaji općenito mirnije rade. Klizni ležaji rađeni su jednostavno i mogu biti dijeljeni. Kod čistog trekućeg trenja klizni ležaji postižu gotovo neograničenu trajnost i mogu raditi najvećim brzinama vrtnje. Općenito su jeftiniji od valjnih ležaja.

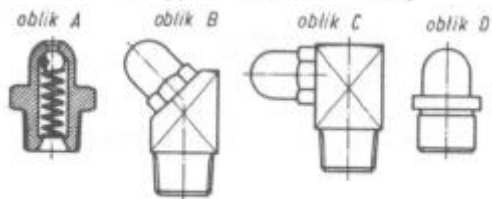
### 1.5.3 Oprema za podmazivanje mastima

Podmazivanje mastima je jednostavno i jeftino. Primjenjuje se za podmazivanje nisko opterećenih sporednih ležajeva i zglobova. Često se mast mora prikladnim uređajima tlačiti do podmazivanih dodirnih površina elemenata koje se uzajamno gibaju.

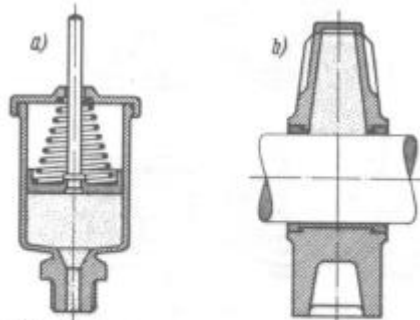
Višak masti ne curi s ležajeva već formira vijenac koji štiti od onečišćenja. Međutim, pri prekomjernom zagrijavanju može doći do topljenja i istjecanja otopine masti, do pražnjenja spremnika te pregrijavanja i otkaza ležajeva. [Decker (1987), s. 197]



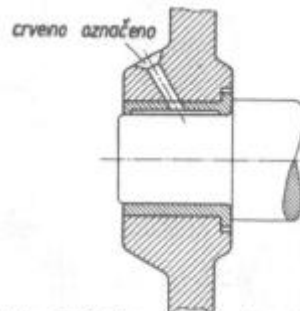
Slika 210. Staufferova mazalica  
Din 3411 (JUS M.C4.600 i 601)



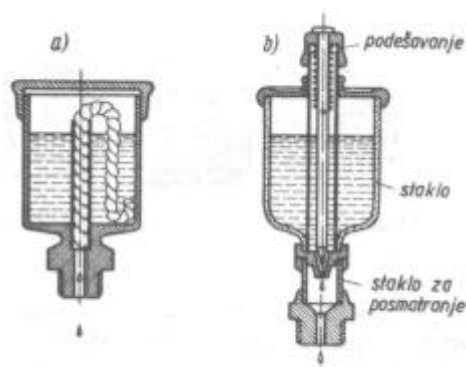
Slika 211. Kuglaste glave za dovođenje maziva  
DIN 3402 (JUS M.C4.611 – 614)



Slika 212. Samopodmazivanje mastima;  
a) mazalica s oprugom;  
b) s komorom za mast



Slika 213. Otvor za podmazivanje uljem

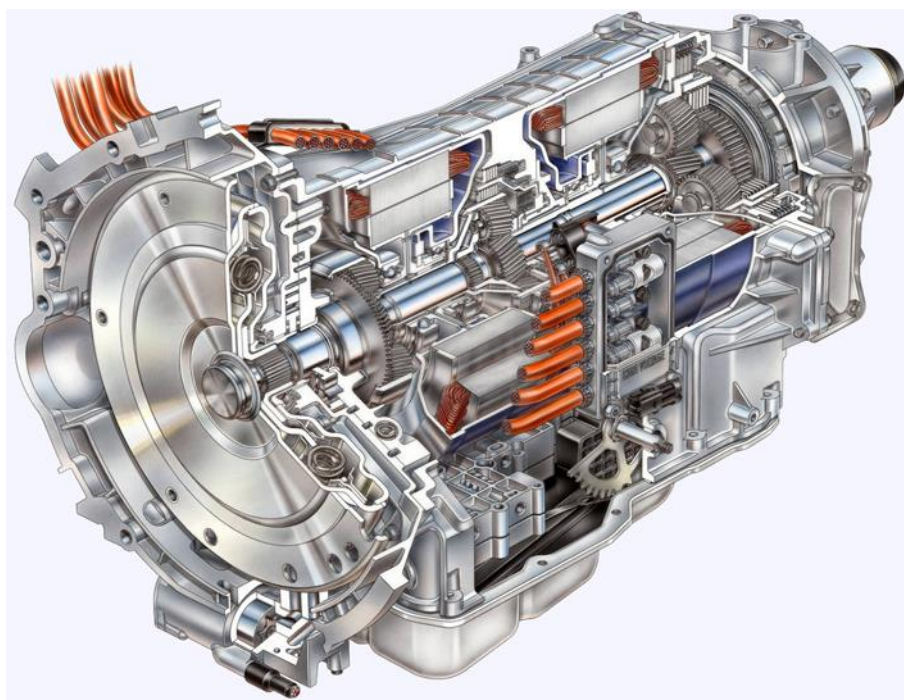


Slika 214. Samopodmazivanje uljem:  
a) mazalica s fitiljem; b) otkapna mazalica

Dovodni kanali zatvaraju se *Staufferovim mazalicama* DIN 3411 (JUS M.C4.600–601; slika 210) ili *kuglastim glavama za podmazivanje* DIN 3402, (JUS M.C4.611–614; slika 211). Okretanjem poklopca s navojima ostvaruje se u napunjenoj mazalici potreban tlak. Ako svi kanali za dovođenje maziva dolaze s jednog središnjeg mjesta, s tog se mjesta mogu opskrbiti istodobno sva ležajna mjesta. Postoje, osim toga, *mazalice s oprugom* (mazalice za masti), u kojima je stap opterećen oprugom i stalno tlači na zalihi masti, te tako opskrbljuje mašću mjesta za podmazivanje (sl. 212a). Ako se u tijelu ležaja nalazi zaliha masti (sl. 212b) koja svojom težinom tlači na rukavac i time osigurava stalno podmazivanje, onda se to naziva *podmazivanje s komorom za mast*.

### Primjeri podmazivanja ležajeva

U kućištima reduktora bar jedan zupčanik mora biti uronjen u mazivo ulje. Pri vrtnji zupčanici reduktora razbacuju ulje po prostoru kućišta i na taj način opskrbljuju s dovoljnom količinom maziva uzajamno gibajuće kontaktne površine elemenata reduktora (*zupčanici, ležajevi*). Punjenje reduktora mazivim uljem preko određene granice ne poboljšava podmazivanje nego naprotiv povećava gubitke koji prate intenzivnije bućkanje (*udaranje zubaca zupčanika o površinu ulja*).

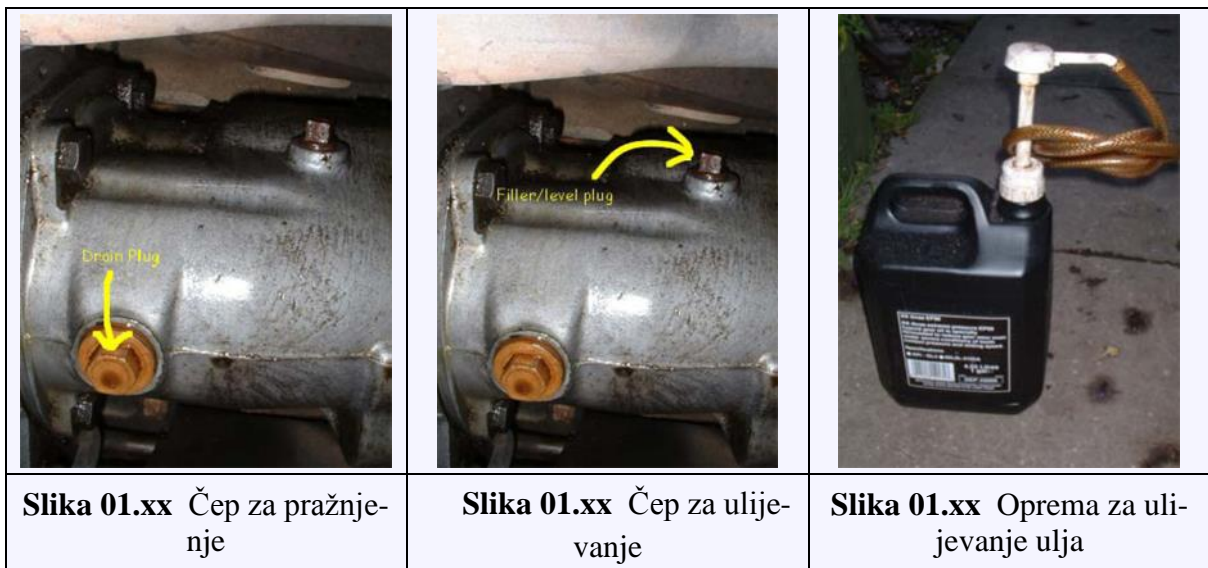


**Slika 01.xx** Mijenjač automobila (*GMC Yukon – hibrid u fazi testiranja*)

Dinamikom koju određuje proizvođač motornog vozila, postavlja se ispod mjenjača, na prikladno mjesto, posuda za prikupljanje ulja, odvrće se i odlaže na stranu navojni čep ispusnog otvora (*paziti da ne upadne u posudu za prikupljanje otpadnog ulja*) te iz mjenjača ispušta ulje. Otvor s čepom se nalazi na najnižoj točki unutarnjeg prostora kućišta mjenjača – **S-01.xx** (*pogled odozdo*). Po prestanku istjecanja ulja ispusni se otvor ponovo zatvara zavrtnjem i pritezanjem navojnog čepa.

Odvrcer se i odlaže u stranu navojni čep otvora za ulijevanje ulje (*S-01.xx*) koji se nalazi na boku kućišta mjenjača. Svježe ulje, marke, tipa i vrste preporučene od strane proizvođača vozila, uz korištenje prikladne opreme (*S-01.xx*), ulijeva se kroz otvor za ulijevanje ulja dok razina ulja ne dopre do najnižeg dijela otvora (*koji određuje optimalnu razinu lja u mjenjaču*). Po istjecanju eventualnog viška, zatvara se otvor za ulijevanje zavrtnjem i pritezanjem navojnog čepa.





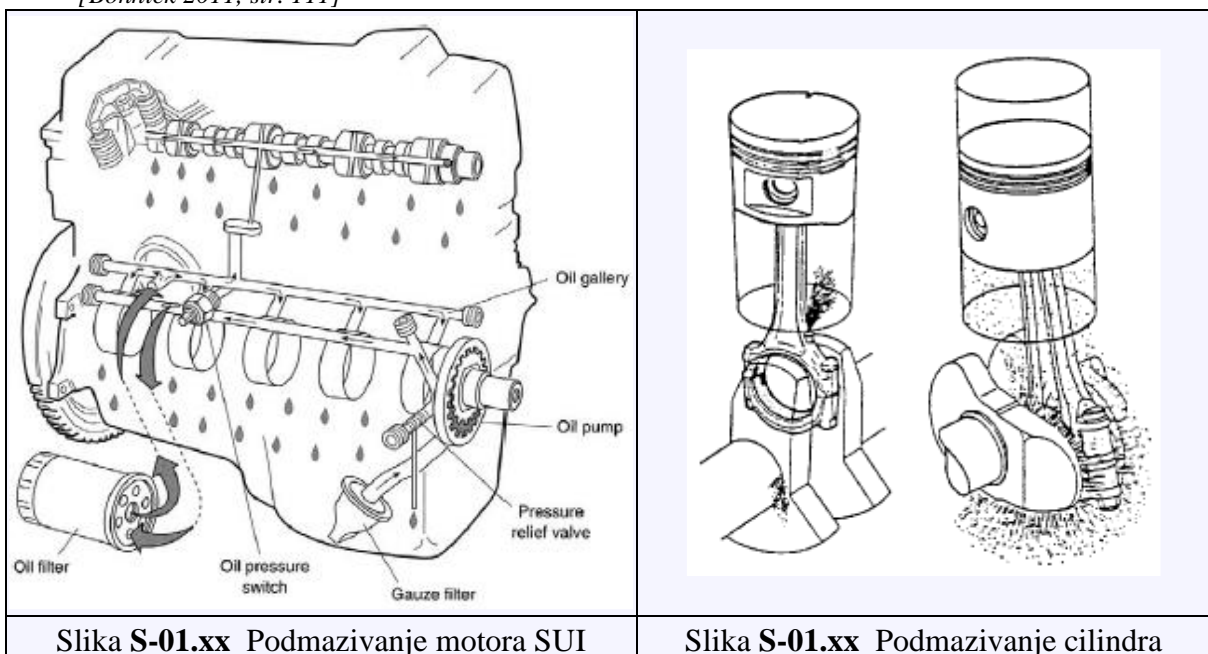
Pri izboru ulja za mjenjač vozila moraju se poštovati preporuke proizvođača vozila.

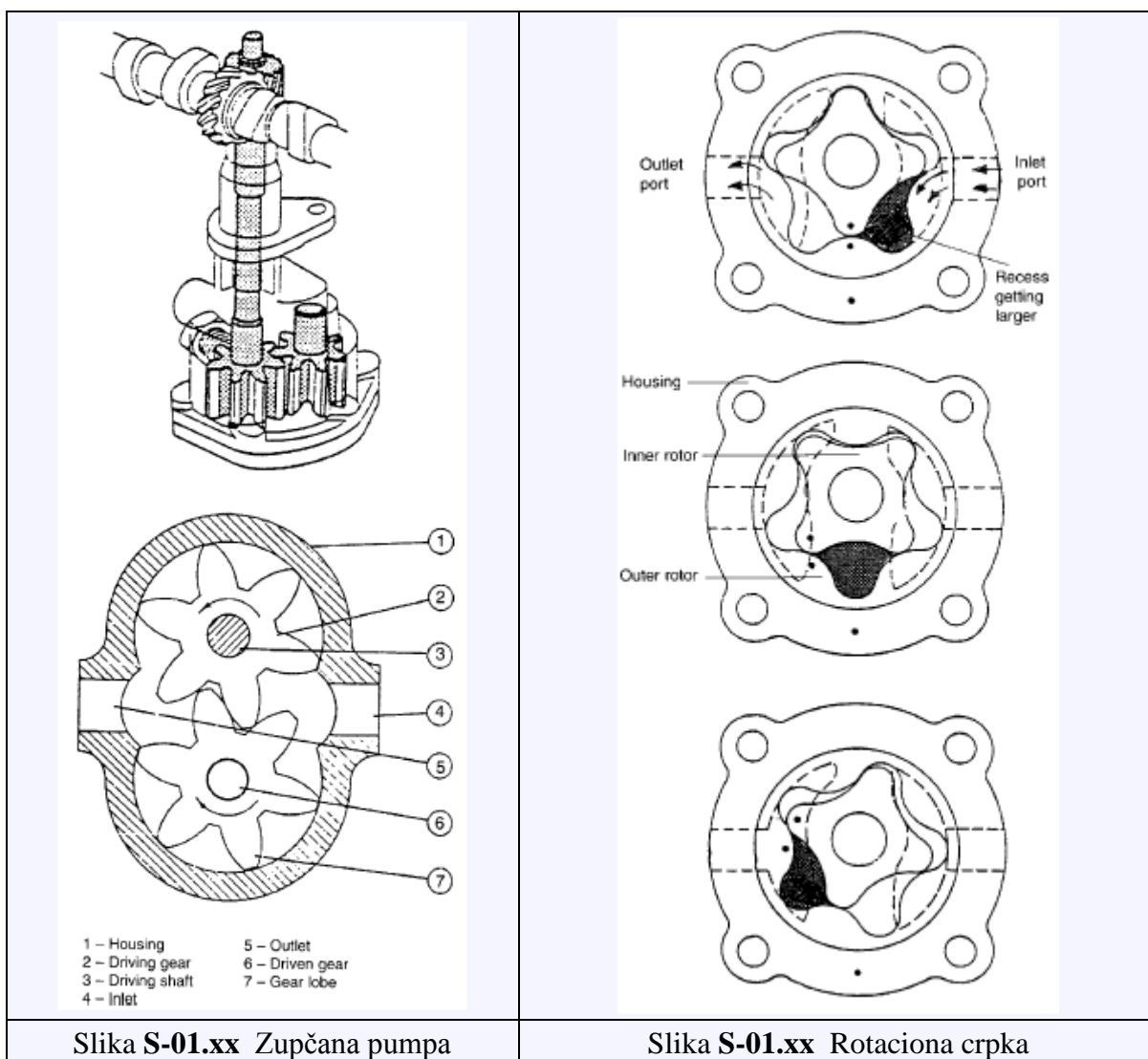
## Podmazivanje zupčanika

[Böge (2011), str. 1204]

### 1.5.4 Podmazivanje motora s unutarnjim izgaranjem

[Bonnick 2011, str. 111]





Slika S-01.xx Zupčana pumpa

Slika S-01.xx Rotaciona crpka

Zadaci su motornog ulja [Böge (2011), str. L87]:

- smanjenje trenja i trošenja površina uzajamno pokretnih strojnih elemenata (npr. prsteni/cilindri, ležaji radilice),
- poboljšanje hlađenje zagrijanih strojnih elemenata (sustav za hlađenje motora),
- poboljšanje brtvljenja (npr. prsteni/cilindri),
- zaštita stronih elemenata od korozije,
- uklanjanje krutih nečistoća iz zona uzajamno pokretnih strojnih elemenata (npr. prsteni/cilindri, ležaji radilice),
- zadržavanje nečistoća u disperziji (sprječavanje taloženja).

Američko društvo automobilskih inženjera (SAE – Society of Automotive Engineers) viskozitetu mazivih ulja za motore (0W ÷ 60) i mjenjače/diferencijale (70W ÷ 140) podijelilo je u klase **T-01.XX**. U tablici je s W označena zima (en. Winter). [Böge (2011), str. L87]

**Tablica 01.XX** SAE klase viskozitetu motornih ulja

SAE klase	Maksimalni	Granična	Kinematski viskozitet,
-----------	------------	----------	------------------------

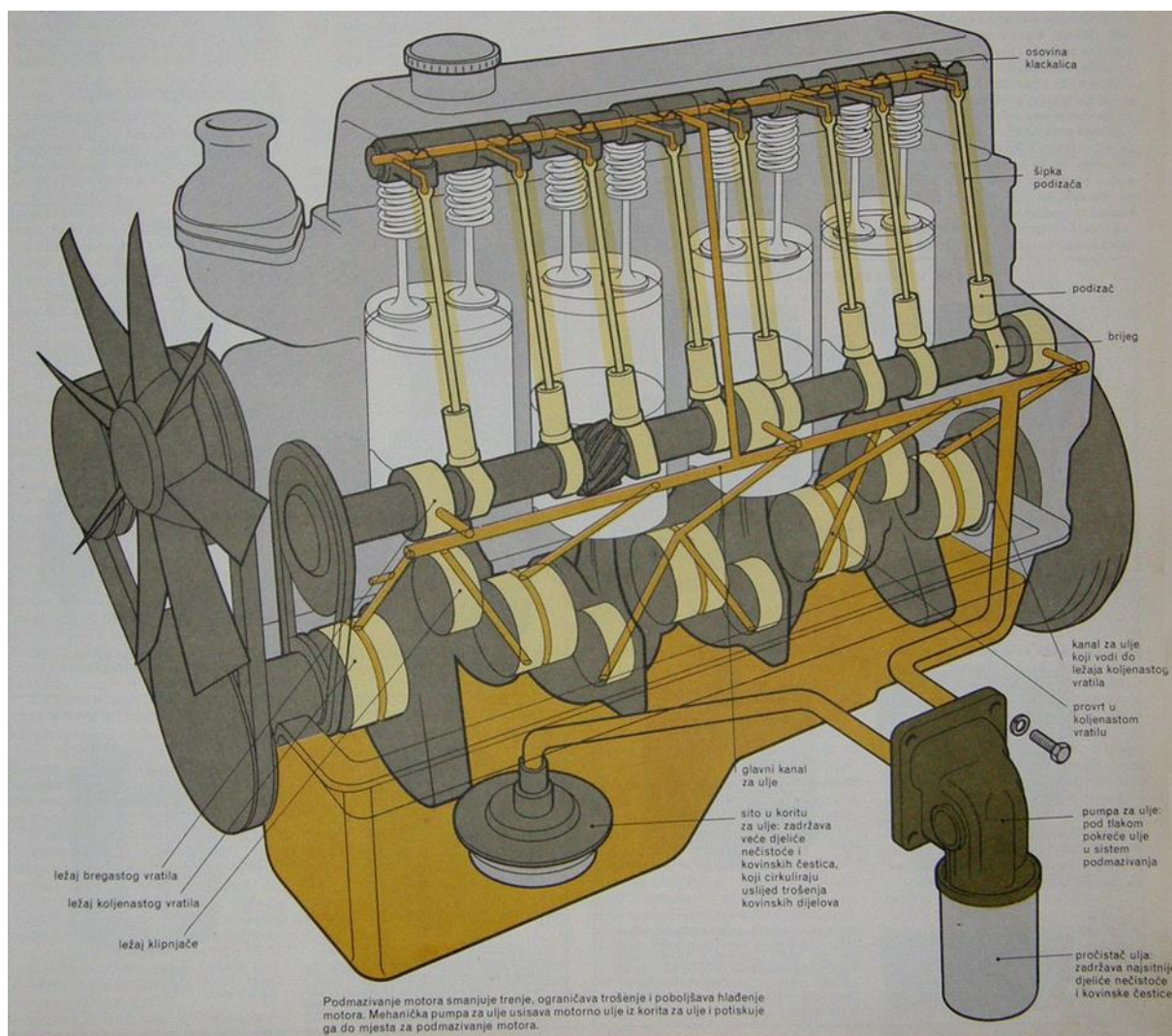
viskoziteta	viskozitet, Pa·s, pri temperaturi, °C	temperatura pumpanja, C°	pri 100 °C u mm <sup>2</sup> /s	
			min.	Max.
0 W	3250 pri -30	-35	3,8	–
5 W	3500 pri -25	-30	3,8	–
10 W	3500 pri -20	-25	4,1	–
15 W	3500 pri -15	-20	5,6	–
20 W	4500 pri -10	-15	5,6	–
25 W	6000 pri -5	-10	9,3	–
20	–	–	5,6	< 9,3
30	–	–	9,3	< 12,5
40	–	–	12,5	< 16,3
50	–	–	16,3	< 21,9

Motorno mazivo ulje mora pri niskim temperaturama imati dovoljno mali viskozitet za male otpore pri startu rada motora, a pri visokim temperaturama dovoljno velik viskozitet za čvrst sloj maziva.

Kod četvorotaktnih motora SUI primjenjuje se tlačno-optočni sustav podmazivanja. Ulje se crpi uljnom pumpom iz uljne kupke motora kroz usisnu košaru. Sigurnosnim ventilom na kućištu pumpe ograničava se tlak ulja (4 ÷ 8 bar) a višak ulja vraća ispred usisa pumpe.

... [Böge (2011), str. L87]

Sustav podmazivanja motora prikazan je na **S-01.XX**:



Slika S 01.XX Sustav podmazivanja motora SUI

## Dodatak

### Literatura

Ashby (2007), str. 227÷243; Böge (2007), str. 458÷466; Böge (2011), str. C23÷C35/E71÷E76/I204/L87÷L91; Budinas (2011), str. 617÷671(klizni ležaji); Carvill (2003), str. 94÷97; Decker (1987), str. 187÷220; Demtröder (2006), str. 200÷204; Dorf (2007) str. 328÷353; Kraut (1976), str. 108÷109/507÷518; Lingaiah (2004), str. 788÷961(ležajevi i tribologija); Mott (2004), str. 703÷707; Norton (2006), str. 438÷497(površine)/598÷655(ležajevi i tribologija); Podrug (2008), str. 51÷59; Singh (2007), str. 190÷241; Steinhilper 2 (2008), str. 10÷77;

1. Czichos H., Habig K.-H.: Tribologie – Handbuch, Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik 3. Auflage, Vieweg+Teubner, 2010.
2. Czichos H.: Tribology – A Systems Approach to the Science and Technology of Friction Lubrication and Wear; Elsevier, 1978.
3. Neale M.: The Tribology Handbook, 2nd Edition; Butterworth-Heinemann, 1999.
4. Stachowiak G. W., Batchelor A. W.: Engineering Tribology, 3rd Edition; Elsevier - Butterworth-Heinemann, 2005.
5. Takadoun J.: Materials and Surface Engineering in Tribology; ISTE, Wiley, 2008.
6. Totten G. E., Liang H.: Mechanical Tribology - Materials Characterization and Applications; Marcel Dekker, 2004.
7. Totten G. E.: Handbook of Lubrication and Tribology - Volume I Application and Maintenance, 2nd Edition; CRC, 2006.

*Tribologija – Dorf2005/Ch21-1, Grote2009/317÷323,*

**1.1** *Trenje – Alfirevic1996/204÷205, Avallone2006/125÷134, Berger2008/68÷108, BögeA2011/54÷75, BögeF2011/7÷12,49, BögeL2009/79÷95, BögeA2011/89÷141, Böge2011/C23÷C29,C85÷C91, Brandt2005/15,17,19÷20, Budynas2011/845÷864, Carvill2003/94÷101, Czichos2010/92÷123, Decker1987/187÷188, Elčić1973/333÷336, Haberhauer2011/338÷341, Grote2007/308÷311, Grote2009/323÷325, Kraut1988/63÷64, Lingaiah2004/1019÷1027, Niemann12005/562÷592, Oberg2004/157÷159, Vöth2007/10÷14,*

1.1.1 *Osnove trenja (definicija, vrste) –*

1.1.3 *Mehanizmi i tehnička fizika trenja (klizanje, kotrljanje) – Ashby2007/228÷229,231÷234, Dorf2005/Ch21-7÷8,*

1.1.2 *Trenje i materijali – Ashby2007/229÷230, materijali za potrebe velikog trenja – Ashby2007/238÷239,*

1.1.4 *Određivanje sile trenja –*

**1.2** *Trošenje – Böge2011/E73÷E74..., Budynas2011/820÷821, Czichos2010/124÷173, Decker1987/435, Grote2007/308÷311, Grote2009/325÷332, Niemann12005/730÷731,754÷756, Shigley2004/1067÷1084,*

1.2.1 *Osnove trošenja (definicija, vrste) – Ashby2007/229, Dorf2005/Ch21-8÷12,*

1.2.2 *Mehanizmi i tehnička fizika trošenja (klizanje, kotrljanje) – Ashby2007/229,234÷235,*

1.2.3 *Trošenje i materijali – Ashby2007/230÷231,239÷240,*

1.2.4 *Određivanje vijeka trajanja elementa*

**1.3** *Podmazivanje – Böge2011/I147,I174÷I178,I204÷I205, K27÷K30,L85,L87÷L89,M32,N8÷11,O3,O10, Bonnick2011/110÷125,*

*Budynas2011/603÷604,617÷671,820÷821, Czichos2010/174÷192, Decker1987/188,193÷196, Dorf2005/Ch21-14÷17,*

*Elčić1973/336÷343, Grote2007/311, Grote2009/332÷337, Haberhauer2011/316÷338, Lingaiah2004/788-961,*

*Margithu2001/317÷336, Niemann12005/731÷734, Norton2006/598÷629, Shigley2004/623÷652, Spotts1961/153÷170,*

1.3.1 *Osnove podmazivanja (definicija, vrste)*

1.3.2 *Mehanizmi i tehnička fizika podmazivanja (klizanje, kotrljanje) – Ashby2007/235÷236,*

1.3.3 *Podmazivanje i materijali – Ashby2007/237÷238,*

1.3.4 *Sustavi podmazivanja – Neale1999/337÷340,*

**1.4** *Maziva – Avallone2006/544÷552, Böge2011/E72÷E73, Czichos2010/433÷450, Decker1987/187÷193, DIN2008/326÷330, Elčić1973/345÷354, Grote2007/311÷315, Grote2009/337÷348, Kraut1988/311÷317, Niemann12005/734÷753,*

1.4.1 *Maziva ulja – Garrett2001/604,*

1.4.2 *Mazive masti*

1.4.3 *Kruta maziva*

1.4.4 *Izbor maziva*

**Oprema za podmazivanje – Czichos2010/451÷596, Decker1987/197÷199, DIN2008/495÷502, Niemann12005/753÷754,759÷761,**

1.5.1 *Oprema za podmazivanje uljima*

1.5.2 *Oprema za podmazivanje mastima*

1.5.3 *Primjeri podmazivanja ležajeva*

1.5.3 *Podmazivanje motora s unutarnjim izgaranjem – Garrett2001/609,*

## 70 Elementi strojeva 2

**Dodaci:** Carvill2003/322÷340, Decker/103, Dorf2005/Ch21-9÷10, Grote2007/578, Muhs2006/302, Niemann12005/727÷730, Singh2007/190÷215,

*Literatura* (obrada, rječnik)

*Podloge* (kratice, norme, internet, razno)

*Provjere znanja* (teme, pitanja, zadaci)

**Literatura:** Ashby2007/227÷243, BögeA2011, BögeF2011, BögeL2011, BögeT2011, Czichos1978, Czichos2010, Dorf2005/Ch21, Garrett2001, Grote2009/317÷348, Kolumbić2010/10-9÷10-13, Niemann12005/562÷592,727÷756,759÷761, Neale1999, Oberg2008/2156÷2178, Oberg2004/2332÷2345, Pandžić2008/132÷139, Smith2000/552÷683, Stachowiak2005, Steinhilper2008/10÷77, Stolarski1990, Takadoun2008, Totten2004, Totte2006, Witel2011/71÷90,293,497,509,530÷536,544÷547,559÷575,694÷696,...(index),

*Internet*

## Podloge

### Glosar

**Trenje** – otpor uzajamnom gibanju elemenata koji se dodiruju.

**Suho trenje** – trenje uz neposredne kontakte površina uzajamno pokretnih elemenata.

### Granično trenje

**Trenje uz podmazivanje** – trenje bez neposrednih kontakata površina uzajamno pokretnih elemenata.

### Riječnik

hrvatski	engleski	njemački
abrazija	abrasion	Abrasion
adhezija	adhesion	Adhesion
trenje	friction	Reibung
trošenje	wear	Verschleiß
tribologija	tribology	Tribologie
podmazivanje	lubrication	Schmierung
maziva	lubricants	Schmierstoffe

### Oznake

### Formule

Normalna sila,  $F_n$ :

$$F_n = A_r \cdot R_e \quad [F_r] = \text{N}$$

gdje je:  $A_r$  – stvarna dodirna površina,  $\text{mm}^2$ ,  
 $R_e$  – granica razvlačenja,  $\text{N/mm}^2$ .

### Norme

Tablica P-01.01 Trenje, trošenje, podmazivanje, maziva – izbor [Muhs (2006.), str. 293]

Norma	Datum	Naslov
-------	-------	--------

## 72 Elementi strojeva 2

DIN 31 661	12.83	Gleitlager: Begriffe. Merkmale und Ursachen von Veränderungen und Schäden
DIN 3979	07.79	Zahnrad Schäden an Zahnradgetrieben: Bezeichnung. Merkmale. Ursachen
DIN 51501	11.79	Schmierstoffe; Schmierole L-AN, Mindestanforderungen
DIN 51502	08.90	Schmierstoffe und verwandte Stoffe; Kurzbezeichnung der Schmierstoffe und Kennzeichnung der Schmierstoffbehälter: Schmiergeräte und Schmierstellen
DIN 51506	09.85	Schmierstoffe: Schmieröle VB und VC ohne Wirkstoffe und mit Wirkstoffen und Schmieröle VDL; Einteilung und Anforderung
DIN 51509-1	06.76	Auswahl von Schmierstoffen für Zahnradgetriebe: Schmieröle
DIN 51512	05.88	Schmierstoffe: SAE Viskositätsklassen für Schmieröle Kraftfahrzeuggetriebe
DIN 51515	06.01	Schmierstoffe und Reglerflüssigkeiten für Turbinen: L-DT für normale thermische Beanspruchung
DIN 51517-1	01.04	Schmierstoffe: Schmieröle: Schmieröle C: Mindestanforderungen
DIN 51517-2	01.04	–; –; Schmieröle CL: Mindestanforderungen
DIN 51517-3	01.04	–; –; Schmieröle CLP: Mindestanforderungen
DIN 51810 E	08.05	Prüfung von Schmierstoffen: Bestimmung der Scher Viskosität von Schmierfetten mit dem Rotationsviskosimeter; Messsystem Kegel und Platte
DIN 51818	12.81	Schmierstoffe: Konsistenz-Einteilung für Schmierfette: NLGI-Klassen
DIN 51524-1E	07.04	Druckflüssigkeiten: Hydrauliköle; Hydrauliköle HL. Mindestanforderungen
DIN 51524-2E	07.04	Druckflüssigkeiten: Hydrauliköle: Hydrauliköle HLP. Mindestanforderungen
DIN 51524-3E	07.04	Druckflüssigkeiten; Hydrauliköle; Hydrauliköle HVLP, Mindestanforderungen
DIN 51825	04.06	Schmierstoffe; Schmierfette K; Einteilung und Anforderungen
DIN 51826	01.05	Schmierstoffe; Schmierfette G: Einteilung und Anforderungen
DIN ISO 2909	08.04	Mineralölerzeugnisse; Berechnung des Viskositätsindex aus der kinematischen Viskosität

[Czichos (2010), str. 703 ÷713]

### **Tribologija – opće:**

DIN 50323-1, 1988-11: Tribologie; Begriffe

DIN 50323-2, 1995-08: Tribologie, Verschleiß, Begriffe

DIN 50323-3, 1993-12: Tribologie, Reibung, Begriffe, Arten, Zustände, Kenngrößen

VDI 3822 Blatt 5 (Januar 1999): Schadensanalyse; Schäden durch tribologische Beanspruchungen

DIN EN ISO 13565-2, 1998-04: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften – Teil 2: Beschreibung der Höhe mittels linearer Darstellung der Materialtraganteilkurve

### **Trenje:**

ASTM D4103, 1999: Standard Practice for Preparation of Substrate Surfaces for Coefficient of Friction Testing

ASTM E 303, 1993: Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester

### **Trošenje:**

DIN 50320, 1979-12: Verschleiß; Begriffe, Systemanalyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes

ASTM G 40, 2005: Standard Terminology Relating to Wear and Erosion

[Czichos (2010), str. 703 ÷713] – detaljno



### Podaci

Typical values of coefficient of friction of various material pairs are presented in Table 21.1 [Avallone and Baumeister, 1987]. It should be noted that values of coefficient of friction depend on the operating conditions<sup>3/4</sup>loads, speeds, and the environment <sup>3/4</sup>and the values reported in Table 21.1 should therefore be used with caution.

[Dorf (2007), str. 337]

Materials	$\mu_{st}$		$\mu_{dn}$	
	Dry	Greasy	Dry	Greasy
Hard steel on hard steel	0,78	0,11 (a) 0,23 (b) 0,15 (c) 0,11 (d) 0,0075 (p) 0,0052 (h)	0,42	0,029 (h) 0,081 (c) 0,080 (i) 0,058 (j) 0,084 (d) 0,1050 (k) 0,096 (l) 0,108 (m) 0,12 (a)
Mild steel on mild steel	0,74		0,57	0,09 (a) 0,19 (u)
Hard steel on graphite	0,21	0,09 (a)		
Hard steel on babbitt (ASTM 1)	0,70	0,23 (b) 0,15 (c) 0,08 (d) 0,085 (e)	0,33	0,16 (b) 0,06 (c) 0,11 (d)
Hard steel on babbitt (ASTM 8)	0,42	0,17 (b) 0,11 (c) 0,09 (d) 0,08 (e)	0,35	0,14 (b) 0,065 (c) 0,07 (d) 0,08 (h)
Hard steel on babbitt (ASTM 10)		0,25 (b) 0,12 (c) 0,10 (d) 0,11 (e)		0,13 (b) 0,06 (c) 0,055 (d)
Mild steel on cadmium silver				0,097 (f)
Mild steel on phosphor bronze			0,34	0,173 (f)
Mild steel on copper lead				0,145 (f)
Mild steel on cast iron		0,183 (c)	0,23	0,133 (f)
Mild steel on lead	0,95	0,5 (f)	0,95	0,3 (f)
Nickel on mild steel			0,64	0,178 (x)
Aluminum on mild steel	0,61		0,47	
Magnesium on mild steel			0,42	
Magnesium on magnesium	0,6	0,08 (y)		
Teflon on Teflon	0,04			0,04 (f)
Teflon on steel	0,04			0,04 (f)
Tungsten carbide on tungsten carbide	0,2	0,12 (a)		

Tungsten carbide on steel	0,5	0,08 (a)		
Tungsten carbide on copper	0,35			
Tungsten carbide on iron	0,8			
Bonded carbide on copper	0,35			
Bonded carbide on iron	0,8			
Cadmium on mild steel			0,46	
Copper on mild steel	0,53		0,36	0,18 (a)
Nickel on nickel	1,10		0,53	0,12 (w)
Brass on mild steel	0,51		0,44	
Brass on cast iron			0,30	
Zinc on cast iron	0,85		0,21	
Magnesium on cast iron			0,25	
Copper on cast iron	1,05		0,29	
Tin on cast iron			0,32	
Lead on cast iron			0,43	
Aluminum on aluminum	1,05		1,4	
Glass on glass	0,94	0,01 (p) 0,005 (q)	0,40	0,09 (a) 0,116 (v)
Carbon on glass			0,18	
Garnet on mild steel			0,39	
Glass on nickel	0,78		0,56	
Copper on glass	0,68		0,53	
Cast iron on cast iron	1,10		0,15	0,070 (d) 0,064 (n)
Bronze on cast iron			0,22	0,077 (n)
Oak on oak (parallel to grain)	0,62		0,48	0,164 (r) 0,067 (s)
Oak on oak (perpendicular)	0,54		0,32	0,072 (s)
Leather on oak (parallel)	0,61		0,52	
Cast iron on oak			0,49	0,075 (n)
Leather on cast iron			0,56	0,36 (t) 0,13 (n)
Laminated plastic on steel			0,35	0,05 (t)
Fluted rubber bearing on steel				0,05 (t)

Source: Adapted from Avallone, E. A. and Baumeister, T., III, 1987. *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers*, 9th ed. McGraw-Hill, New York.

Note: Reference letters indicate the lubricant used: a – oleinska kiselina  
b – osovinsko ulje (*lako mineralno ulje*)  
c – ricinusovo ulje  
d – ulje iz svinjske masti  
e – osovinsko ulje (*lako mineralno ulje*) s dodatkom 2 % oleinske kiseline  
f – srednje mineralno ulje  
g – srednje mineralno ulje s dodatkom 0,5 % oleinske kiseline  
h – stearinska kiselina  
i – mast (*na bazi cink-oksida*)  
j – grafit  
k – turbinsko ulje s dodatkom 1 % grafita  
l – turbinsko ulje s dodatkom 1 % stearinske kiseline  
m – turbinsko ulje (*srednje mineralno ulje*)  
n – maslinovo ulje  
p – palmitinska kiselina  
q – ricinoleinska kiselina

- r – suhi sapun
- s – svinjska mast
- t – voda
- u – repičino ulje
- v – 3-in-One ulje (*mješavina za opću namjenu u kućanstvu*)
- w – oktanol (*alkohol s 10 C atoma*)
- x – triolein
- y – parafinsko ulje s dodatkom 1 % laurinske kiseline

[Böge (2011), str. 459]

## Razno

### Teme

2. **Trenje, trošenje i podmazivanje** [Grote2009, Czichos2010, Neale1999, Niemann12005]
1. Tribologija – definicija, tribološki sustavi [Grote2009/318]
  2. Trenje – definicija, uzroci, posljedice i vrste trenja
  3. Mehanizam trenja
  4. Tehnička fizika trenja – normalna sila, sila trenja i vučna sila [Czichos2010/110]
  5. Statičko i dinamičko trenje
  6. Rad koji se troši za savladavanje trenja i snaga trenja
  7. Trenje na strmoj ravnini [Böge2011/C23, Brandt2005/19]
  8. Trenje i mjerenja
  9. Trenje i materijali
  10. Primjeri određivanja vučne sile i zaustavnog puta vozila
  11. Trošenje – definicija, uzroci, posljedice i vrste trošenja
  12. Mehanizmi trošenja
  13. Tehnička fizika trošenja – brzina trošenja i vijek trajanja elemenata
  14. Trošenje i materijali
  15. Podmazivanje – definicija, uzroci, posljedice i vrste podmazivanja
  16. Mehanizmi podmazivanja
  17. Tehnička fizika podmazivanja
  18. Maziva – definicija, vrste i i zadaci
  19. Sastav i osnovne karakteristike mazivih ulja [Czichos2010/433]
  20. Zadaci i vrste mazivih ulja
  21. Primjena mazivih ulja
  22. Sastav i osnovne karakteristike mazivih masti
  23. Zadaci i vrste mazivih masti [Czichos2010/440]
  24. Primjena mazivih masti
  25. Zadaci, vrste i svojstva krutih maziva
  26. Primjena krutih maziva
  27. Sustavi za podmazivanje [Neale1999/337]
  28. Oprema za podmazivanje uljima
  29. Oprema za podmazivanje mastima
  30. Podmazivanje motora s unutarnjim izgaranjem
  31. Podmazivanje mjenjača vozila

### Izvodi

Tablica P-01.02 Svojstva mazivih ulja [Wittel (2011.), str. 79]

Svojstvo	Opis
Alterungsbeständigkeit (Oxidationsbeständigkeit)	Beständigkeit gegen eine Veränderung der Schmieröleigenschaften unter Einwirkung von Luftsauerstoff, Wärme, Licht- und Strahlungsenergie, Katalyse sowie von Nachfolgeprozessen wie Polymerisation, Kondensation, Oxidation (bestimmt die Lebensdauer des Öls)
Biologische Abbaubarkeit	Kennzeichnet, inwieweit eine bestimmte prozentuale Menge der Grundsubstanzen des Schmieröls unter definierten Bedingungen durch Mikroorganismen biologisch (leicht) abgebaut werden (z. B. gefordert bei Verlustschmierung). Die Abbauprodukte sind ökotoxikologisch unbedenklich
Brennpunkt	Temperatur, bei der das Öldampf-Luft-Gemisch nach der Zündung weiterbrennt

	(liegt ca. 30 ÷ 40 °C über dem Flammpunkt)
Dichtungsverträglichkeit (Elastomerverträglichkeit)	Kennzeichnet die Verträglichkeit des Öls bzw. bestimmter Additive mit Dichtungswerkstoffen (Kunststoffen)
Dispergiervermögen	Kennzeichnet, inwieweit die Bildung eines feinverteilten Öl-Wasser-Gemischs möglich ist
Demulgierbarkeit	Kennzeichnet, inwieweit das Abscheiden von Wasser aus dem Öl möglich ist
Emulgierfestigkeit	Widerstand eines Öls gegen Emulsionsbildung
Flammpunkt	Niedrigste Temperatur, bei der sich die Dämpfe des Öls (Luft-Dampf-Gemisch) bei offener Flamme entzünden.
Stockpunkt (Pourpoint) (Kälteverhalten)	Temperatur, bei der ein Öl so steif wird, das es unter Einwirkung der Schwerkraft gerade noch fließt
Neutralisationsvermögen	Kennzeichnet, inwieweit die während des Betriebs entstehenden sauren oder alkalischen Bestandteile durch das Öl neutralisiert werden können
Schaumverhalten	Luft in Ölen führt zur Schaumbildung (Luftblasen, umhüllt mit dünnen Ölschichten). Dieser zerfällt, bevor er erneut in die Schmierstelle gelangt (ungefährlich) oder es bildet sich ein stabiler Oberflächenschaum, der zu einer deutlichen Änderung der Schmierwirkung führen kann.
Scherstabilität	Kennzeichnet, inwieweit ein durch Scherung bedingter irreversibler Viskositätsabfall eintritt
Thermische Stabilität (Thermostabilität)	Widerstand des Öls gegen eine Änderung der chemischen Struktur bei hohen Temperaturen
Verdampfungsverhalten	Kennzeichnet den Umfang von entstehenden Ölverdampfungsverlusten bei hohen Temperaturen
Verkokungsneigung (Koksrückstand)	Kennzeichnet, in welchem Umfang sich bei hoher thermischer Belastung von Mineralölen Ölkohle bildet
Viskosität	Eigenschaft des fließfähigen Öls, unter Einwirkung einer Kraft (Spannung) zu fließen und reversibel verformt zu werden, s. auch Abschn. 24.4.1
Viskositäts-Temperatur-Verhalten (Viskositätsindex)	Kennzeichnet, in welchem Umfang sich eine Temperaturänderung auf die Änderung der Viskosität auswirkt, s. auch Abschnitt 24.4.1
Wärmeleitfähigkeit	Kenngröße zur Beschreibung des Wärmetransports im Öl
Wärmekapazität (spezifische)	Kenngröße zur Beschreibung der Wärmeaufnahmefähigkeit eines Öls

Tablica P-01.03 Aditivi za maziva ulja, primjena i mehanizam djelovanja [Wittel (2011.), str. 80]

Tipa aditiva	Primjena	Način djelovanja
Emulgatoren	Stabilisierung von Öl-Wasser-Gemischen	Adsorption des Emulgators an der Grenzschicht Öl/Wasser, dadurch Feinverteilung (Dispergierung) beider Flüssigkeiten
Geruchsveränderer	Erzeugung eines kennzeichnenden, gewünschten Geruchs	Bildung stark riechender Verbindungen
Dispergent-Wirkstoffe	Verringerung oder Verhütung von Ablagerungen an Oberflächen bei hohen Betriebstemperaturen	Entstehung von öllöslichen oder im Öl suspendierten Produkten
Dispersant-Wirkstoffe	Verhinderung oder Verhütung von Schlamm- und Schmutzbildung bei niedrigen Temperaturen	Verunreinigungen werden mit öllöslichen Molekülen umhüllt, welche die Ablagerung des Schlammes verhindern
Farbstoffe	Erzeugung kräftiger Farben	Lösung im Öl unter Farbwirkung
Fressschutzwirkstoffe (Hochdruckzusätze, EP: Extreme Pressure)	Verhinderung von Mikroverschleißungen zwischen Metalloberflächen bei hohen Drücken und Temperaturen	Bildung einer wenig scherfesten Schicht durch chemische Reaktion mit der Metalloberfläche (ständiges Abscheren und Neubilden)
Haftverbesserer	Verbesserung des Haftvermögens des Schmierstoffs	Erhöhung der Viskosität an der Grenzfläche zum Werkstoff (Additiv ist zäh und klebrig)

Korrosionsinhibitoren (z. B. Rostschutzinhibitoren für Eisenwerkstoffe)	Verhinderung von Korrosion durch — für korrosive Medien undurchlässige — Deckschichten	Chemische Reaktion mit der Metalloberfläche oder Adsorption der Additive an der Metalloberfläche
Metalldeaktivatoren	Verhinderung des katalytischen Einflusses auf Oxidation und Korrosion	Reaktion mit Metallionen unter Bildung adsorptiver Schutzschichten
Oxidationsinhibitoren	Minimierung von Verfärbung, Schlamm-, Lack- und Harzbildung durch Oxidation	Unterbrechung der Oxidationskettenreaktion, Verhinderung katalytischer Reaktionen
Stockpunktserniedriger (Pourpointerniedriger)	Herabsetzung des Stockpunkts des Öls	Umhüllung der entstehenden Paraffinkristalle und Verhinderung des Wachstums
Schauminhibitoren	Verhinderung der Bildung von stabilem Schaum	Zerstörung der Ölhäutchen, die die Luftblasen umgeben
Verschleißschutzadditiv (Anti-Wear)	Reduzierung des Verschleißes zwischen Metalloberflächen	Bildung von Oberflächenschichten durch Reaktion mit der Metalloberfläche, die plastisch deformiert werden und das Tragbild verbessern
Viskositätsindexverbesserer	Verringerung der Viskositätsänderung bei Veränderung der Temperatur	Polymermoleküle beeinflussen die Öleigenschaften temperaturabhängig, sie sind stark verknaut (kaltes Öl) oder entknaut (warmes Öl)

Tablica P-01.04 Referentne vrijednosti koeficijenata trenja za različita stanja i vrste trenja [Wittel (2011.), str. 80]

Stanje trenja	Vrsta trenja	Koeficijent trenja, 1
Festkörperreibung	Gleitreibung	$0,3 \div 1$ (1,5)
Grenzreibung	Gleitreibung Rollreibung	$0,1 \div 0,2 < 0,005$
Mischreibung	Gleitreibung	$0,01 \div 0,1$
	Wälzreibung Zahnräder	$0,02 \div 0,08$
	Wälzreibung Reibräder (Traktion Fluids)	$0,06 \div 0,12$
	Rollreibung	$0,001 \div 0,005$
Flüssigkeitsreibung	Gleitreibung	$0,001 \div 0,01$
Gasreibung	Gleitreibung	0,0001

Tablica P-01.05 API (American Petroleum Institute) klasifikacija mazivih ulja za motorna vozila [Wittel (2011.), str. 83]

Klassifikation	Betriebsbedingungen	Additive	Anwendungen
GL-1	leicht	keine	Getriebe mit geringen Belastungen und Umfangsgeschwindigkeiten; Kegelräder (spiralverzahnt), Schneckengetriebe
GL-2	leicht – mittel	Verschleißschutz- Wirkstoffe (2,7 Gew.%)	etwas höhere Beanspruchungen als bei GL-1; Stirnradgetriebe, Schneckengetriebe
GL-3	mittel	leichte EP-Zusätze (4 Gew.%)	schwere Belastungs- und Geschwindigkeitsverhältnisse; Kegelräder (spiralverzahnt), Stirnradgetriebe
GL-4	mittel—schwer	normale EP-Zusätze (6,5 Gew.%)	hohe Geschwindigkeiten oder hohe Drehmomente; Hypoidgetriebe, Handschaltgetriebe
GL-5	schwer	wirksame EP-Zusätze (10 Gew.%)	hohe Geschwindigkeiten oder hohe Drehmomente bei zusätzlicher Stoßbelastung; Hypoidgetriebe mit großem Achsversatz, Handschaltgetriebe

Tablica P-01.06 NLGI (National Lubricating Grease Institut) klasifikacija mazivih masti [Wittel (2011.), str. 84]

NLGI-Klasse (DIN 51818)	Walkpanetration <sup>1)</sup> in 0,1 mm	Konsistenz	Anwendungen
000	445 ÷ 475	fließend	Getriebefette, Zentralschmieranlagen
00	400 ÷ 430	schwach fließend	Getriebefette, Zentralschmieranlagen
0	355 ÷ 385	halbflüssig	Getriebefette, Wälzlagerfette, Zentralschmieranlagen
1	310 ÷ 340	sehr weich	Wälzlagerfette
2	265 ÷ 295	weich	Wälzlagerfette, Gleitlagerfette
3	220 ÷ 250	mittelfest	Wälzlagerfette, Gleitlagerfette, Wasserpumpenfette
4	175 ÷ 205	fest	Wälzlagerfette, Wasserpumpenfette
5	130 ÷ 160	sehr fest	Wasserpumpenfette, Blockfette
6	85 ÷ 115	hart	Blockfette

<sup>1)</sup> Fett wird in einem genormten Fettknetter gewalzt, danach wird die Eindringtiefe eines standardisierten Konus in einer festgelegten Zeit gemessen

U Nortonu [(2006), s. 446] obrađena je u izvjesnoj mjeri zbunjujuća

[Norton (2006), str. 446]

**COMPATIBILITY** An important factor affecting adhesion is the metallurgical compatibility of the mating materials. **Metallurgical compatibility** between two metals is defined as *high mutual solubility or the formation of intermetallic compounds*.<sup>[4]</sup> Davies defines two conditions for metallurgical **incompatibility**, meaning that the *metals can then slide on one another with relatively little scoring*.<sup>[5]</sup>

- 1 *The metals must be insoluble in each other, with neither material dissolving in the other nor forming an alloy with it.*
- 2 *At least one of the materials must be from the B-subgroup, i.e., the elements to the right of the Ni-Pd-Pt column in the Periodic Table.*<sup>†</sup>

Unfortunately this terminology can be confusing, because the word *compatibility* usually means an ability to work together, whereas in this context it means that they do not work (slide) together well. Their metallurgical “compatibility” in this case is one of *adhering together*, which acts to prevent sliding, making them **frictionally incompatible**.

Rabinowicz<sup>[33]</sup> groups material pairs into (metallurgically) identical, compatible, partially compatible, partially incompatible, and incompatible categories based on the above criteria. The identical and compatible combinations should not be run together in unlubricated sliding contact. The incompatible and the partial categories can be run together. Figure 7-6 shows a compatibility chart for commonly used metals based on his categories. The dotted circles indicate **metallurgically compatible** metals (i.e., not acceptable for sliding contact). A dark quarter circle indicates **partially compatible**, and a dark half circle **partially incompatible** combinations. The latter are better in sliding contact than the former. The solid-color circles indicate **metallurgically incompatible** pairs that can be expected to resist adhesive wear best of any combinations shown.

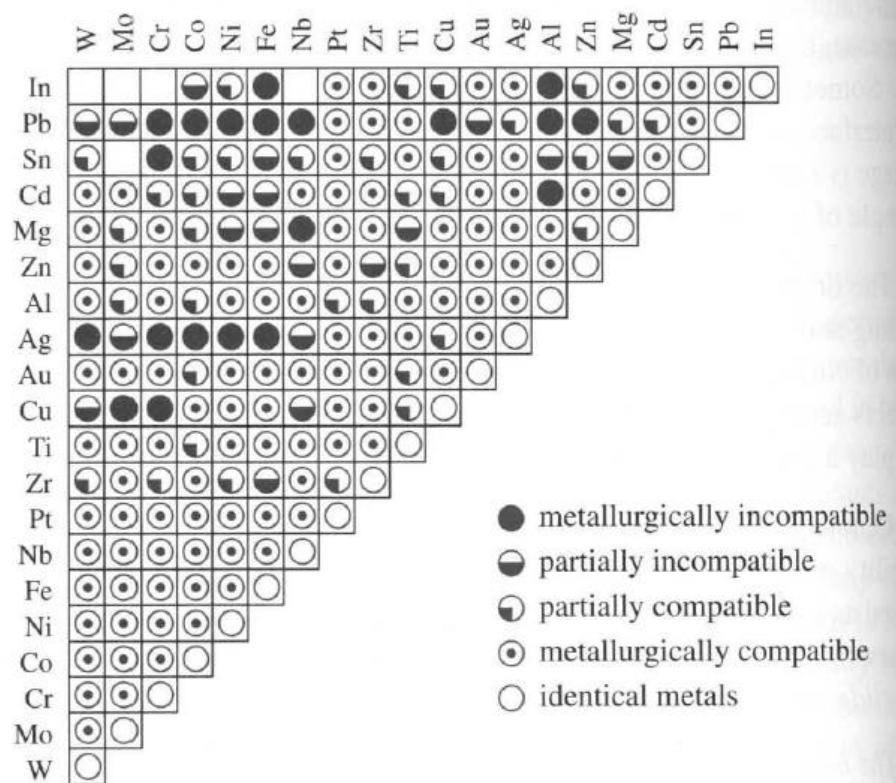


FIGURE 7-6

Compatibility Chart for Metal Pairs Based on Binary Phase Diagrams (Adapted from Figure 7, p. 491, E. Rabinowicz, *Wear Coefficients—Metals*, in *Wear Control Handbook*, M. B. Peterson and W. O. Winer, ed., ASME, New York, 1980, with permission)



**CONTAMINANTS** Adhesive bonding at the asperities can only occur if the material is clean and free of contaminants. Contaminants can take the form of oxides, skin oils from human handling, atmospheric moisture, etc. Contaminants in this context also include materials deliberately introduced to the interface such as coatings or lubricants. In fact, one of the chief functions of a lubricant is to prevent these adhesions and thus reduce friction and surface damage. A lubricant film effectively isolates the two materials and can prevent adhesion even between identical materials.

**SURFACE FINISH** It is not necessary for the surfaces to be “rough” for this adhesive-wear mechanism to operate. The fine-ground finish of the part in Figure 7-1a is seen to have as many asperities available for this process as the rougher milled surface in Figure 7-1b (p. 417).

**COLD-WELDING** If the mating materials are metals, are compatible, and are extremely clean, the adhesive forces will be high and the sliding friction can generate enough localized heat to weld the asperities together. If the clean metal surfaces are also finished to a low roughness value (i.e., polished), and then rubbed together (with sufficient force), they can cold-weld (seize) with a bond virtually as strong as the parent metal. This process is enhanced if done in a vacuum, as the absence of air eliminates contamination from surface oxidation. The **roll-bonding** process in which two compatible metals are cold-welded (in air) by rolling or coining them together under high normal loads is used commercially to make bimetallic strips for thermostats, and dimes and quarters for your pocket.

## Provjera znanja

### Pitanja

1. Definicije tribologije, trenja, trošenja i podmazivanja; uzroci i posljedice trenja i trošenja
2. Definicija, posljedice i vrste trenja
3. Mehanizam trenja
4. Tehnička fizika trenja – normalna sila, sila trenja i vučna sila
5. Statičko i dinamičko trenje
6. Rad koji se troši za savladavanje trenja
7. Trenje i materijali
8. Primjeri određivanja vučne sile i zaustavnog puta
9. Definicija, posljedice i vrste trošenja
10. Mehanizmi trošenja
11. Tehnička fizika trošenja – brzina trošenja
12. Trošenje i materijali
13. Definicija, posljedice i vrste podmazivanja
14. Mehanizmi podmazivanja
15. Tehnička fizika podmazivanja
16. Sastav i osnovne karakteristike mazivih ulja
17. Zadaci i vrste mazivih ulja
18. Sastav i osnovne karakteristike mazivih masti
19. Zadaci i vrste mazivih masti
20. Vrste i svojstva krutih maziva
21. Oprema za podmazivanje uljima
22. Oprema za podmazivanje mastima
23. Podmazivanje motora s unutarnjim izgaranjem

- (a) Definirati tribologiju
- (b) Definirati trenje
- (c) Definirati trošenje
- (d) Definirati mazivo

[Ashby (2007), str. 241/243]

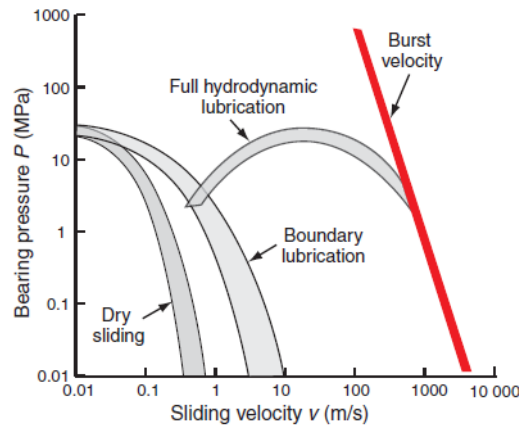
- (e) Definicija koeficijent trenja i pojasniti zašto je neovisan od dodirne površine
- (f) Navesti iskustvene primjere iz sportova kod kojih su potrebni: (a) visoki koeficijenti trenja i (b) niski koeficijenti trenja.
- (g) Navesti iskustvene primjere iz sportova kod kojih je trošenje: (a) poželjno i (b) nepoželjno.
- (h) Koja su svojstva materijala korištenih u izradi pločica za kočnice.
- (i) Use the 'Search' facility to find materials that are used as ball bearings. (Search on the singular – ball bearing – since that picks up the plural as well.)
- (j) Use the 'Search' facility to find materials that are used as for brake pads. Do the same for brake discs.

[Singh (2007), str. 190 ÷ 215] Pitanja i odgovori

### Zadaci

[Ashby (2007), str. 242]

- (k) A 30 mm diameter plane bearing of length 20 mm is to be made of a material with the  $P - v$  characteristics shown in Figure S-Z01.01. If the bearing load is 300 N and the maximum rotation rate is 500 rpm, is it safe to run it dry? If not, is boundary lubrication sufficient? (Remember that the bearing pressure is the load divided by the projected area normal to the load.)



**Slika Z-01.03**  $P - v$  karakteristike raznih nepodmazivanih i podmazivanih klizanja, konačno ograničenih razgradnjom ležaja uslijed centrifugalnih sila pri vrlo visokim brzinama

- (l) A bronze statue weighing 4 tonnes with a base of area  $0,8 \text{ m}^2$  is placed on a granite museum floor. The yield strength of the bronze is 240 MPa. What is the true area of contact,  $A_r$ , between the base and the floor?
- (m) The statue of the previous example was moved to a roof courtyard with a lead floor. The yield strength of the lead is 6 MPa. What now is the true area of contact?
- (n) How would you measure the true area of contact  $A_r$  between two surfaces pressed into contact? Use your imagination to devise ways.

[Wittel (2010), str. 12]

- 4.1 Für einen Kontakt zweier Walzen wurden folgende Betriebsparameter durch Messung bzw. Berechnung bestimmt: Minimale Schmierfilmdicke im Kontakt  $h_{\min} = 2,5 \mu\text{m}$ , Rauheiten der beiden Walzen  $Ra_1 = 1,2 \mu\text{m}$ ,  $Ra_2 = 2,3 \mu\text{m}$ . Bewerten Sie den vorliegenden Reibungszustand (Schmierungszustand).

Siehe Lehrbuch 4.3 und Gl. (4.3) einschließlich der zugehörigen Hinweise.

$\lambda = 1,4$  ( $R_a = 1,75 \mu\text{m}$ ), d. h. im Kontakt liegt der Zustand der Mischreibung vor (beide Bauteile werden nicht vollständig durch den Schmierfilm getrennt, in Teilbereichen berühren sich die Oberflächenrauheiten).

- 4.2 Für ein Mineralöl sind folgende kinematische Viskositäten bekannt:  $\nu_{30} = 6 \text{ mm}^2/\text{s}$  (bei  $30^\circ\text{C}$ ),  $\nu_{100} = 2 \text{ mm}^2/\text{s}$  (bei  $100^\circ\text{C}$ ). Bestimmen Sie die kinematische Viskosität  $\nu_{-20}$  bei  $-20^\circ\text{C}$ .

Siehe Lehrbuch 4.5, Bild 4-9b. Mit zwei bekannten Viskositäten kann eine Gerade in Bild 4-9b eingezeichnet und danach die gesuchte Viskosität abgelesen werden.

$$\nu_{-20} = 30 \text{ mm}^2/\text{s}$$

- 4.3 Für verschiedene Schmieröle soll die Bezeichnung der Öle entsprechend Viskositätsklassifikation angegeben werden. Bekannt sind folgende Angaben:
- a) Industrieschmieröl,  $\nu_{40} = 32 \text{ mm}^2/\text{s}$
  - b) Industrieschmieröl,  $\nu_{40} = 460 \text{ mm}^2/\text{s}$
  - c) Kfz-Getriebeöl,  $\nu_{100} = 8 \text{ mm}^2/\text{s}$
  - d) Kfz-Getriebeöl,  $\nu_{100} = 32 \text{ mm}^2/\text{s}$
  - e) Kfz-Motorenöl,  $\nu_{100} = 8 \text{ mm}^2/\text{s}$
  - f) Kfz-Motorenöl,  $\nu_{100} = 19 \text{ mm}^2/\text{s}$

Siehe Lehrbuch 4.5, Bild 4-14.

- a) ISO VG 32
- b) ISO VG 460
- c) SAE 80W
- d) SAE 140
- e) SAE 20
- f) SAE 50

- 4.4 Für einen Kontakt zweier Walzen aus Stahl sind folgende Angaben bekannt: Kontaktnormalkraft  $F_N = 500 \text{ N}$ , Walzendurchmesser  $d_1 = 40 \text{ mm}$ ,  $d_2 = 30 \text{ mm}$ , Kontaktlänge (= Walzenbreite) = 20 mm. Bestimmen Sie die Hertzsche Pressung im Kontakt beider Walzen.

Siehe Lehrbuch 4.4, Gl. (4.4).

$$p_H = 232 \text{ N/mm}^2 \quad (E = 230\,770 \text{ N/mm}^2 \text{ mit } E_1 = E_2 = 210\,000 \text{ N/mm}^2 \text{ und } \nu_1 = \nu_2 = 0,3, \\ q = 17,1 \text{ mm}).$$

- 4.5 Für ein Mineralöl sind folgende Daten für eine Betriebstemperatur von 90 °C bekannt: Dynamische Viskosität  $\eta_{90} = 5,3 \text{ mPas}$ , Dichte  $\rho_{90} = 825 \text{ kg/m}^3$ . Bestimmen Sie die kinematische Viskosität  $\nu_{90}$  des Öls für 90 °C.

Siehe Lehrbuch 4.5, Gl. (4.6).

$$\nu_{90} = 6,42 \text{ mm}^2/\text{s}.$$

- 4.6 Für ein Schmieröl sind folgende Daten für eine Betriebstemperatur von 60 °C bekannt: Dynamische Viskosität (bei Atmosphärendruck)  $\eta_0 = 135 \text{ mPas}$ , Druckviskositätskoeffizient  $\alpha_{60} = 1,9 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{N}$ . Bestimmen Sie die dynamische Viskosität  $\eta_p$  des Öls im Bauteilkontakt bei einem Druck von 2000 bar.

Siehe Lehrbuch 4.5, Gl. (4.7).

$$\eta_p = 6034 \text{ mPas}.$$

[Norton (2006), str. 446]

- \*7-1 Two 3 × 5 cm blocks of steel with machined finish  $R_a = 0.6 \mu\text{m}$  are rubbed together with a normal force of 400 N. Estimate the true area of contact between them if their  $S_y = 400 \text{ MPa}$ .
- \*7-2 Estimate the dry coefficient of friction between the two pieces in Problem 7-1 if their  $S_{ut} = 600 \text{ MPa}$ .
- \*7-3 For the bicycle pedal arm assembly in Figure P7-1 assume a rider-applied force that ranges from 0 to 400 N at the pedal each cycle. Determine the maximum contact stresses at one sprocket-tooth chain-roller interface. Assume that one tooth takes all the applied torque, the chain roller is 8-mm dia, the sprocket has a nominal (pitch) dia of 100 mm, and the sprocket tooth is essentially flat at the point of contact. The roller and sprocket are made of SAE 1340 steel, induction hardened to HRC45-58. The roller and sprocket contact over a length of 8 mm. Assuming rolling plus 9% sliding, estimate the number of cycles to failure for this particular tooth-roller combination.
- \*7-4 For the trailer hitch from Problem 3-4 on p. 127 (also see Figures P7-2 and 1-5, p. 14), determine the contact stresses in the ball and the ball cup (not shown). Assume that the ball is 2-in dia and the ill-fitting ball cup that surrounds it has an internal spherical surface 10% larger in diameter than the ball.
- \*7-5 For the trailer hitch from Problem 3-5 on p. 127 (also see Figures P7-2 and 1-5, p. 14) determine the contact stresses in the ball and the ball cup (not shown). Assume that the ball is 2-in dia and the ill-fitting ball cup that surrounds it has an internal spherical surface 10% larger in diameter than the ball.
- 7-38 Estimate the dry coefficient of friction between the two materials in Problem 7-37. How does this compare to the value given in Table 7-1?
- \*7-39 A 25-mm-diameter steel shaft of hardness HB420 rotates at 700 rpm in a 40-mm-long plain bronze bushing with an average radial load of 500 N. Estimate the time it would take to remove 0.05 mm of bushing material by adhesive wear if the lubrication were suddenly lost assuming a uniform wear rate around the bushing.
- 7-40 A machine has a tripod base that utilizes 15-mm-dia nylon 11 balls as support pads at its feet. The tripod rests on a flat steel plate. The 360N weight of the machine is distributed equally to the three legs of the tripod. Determine the size of the contact patch and the contact stresses in the nylon balls. Assume that Poisson's ratio for nylon is 0.25.
- 7-41 A ball bearing consists of a number of steel balls (separated by a ball cage) and two rings with raceways as shown in Figure P7-7. The raceways have compound curvature. In a plane containing the axis of the bearing the curvature is concave and conforms closely to the ball radius. In a plane perpendicular to the axis the curvature is convex for the inner raceway and is related to the bore size of the bearing. Determine the size of the contact patch and the maximum contact stresses between a ball and the inner raceway with a radial load of 5200 N in a steel bearing with the following dimensions: ball dia = 8 mm, raceway radius for concave surface = 4.05 mm, raceway radius for convex surface = 13 mm.
- \*7-42 A pair of steel rollers used in a manufacturing process roll together with a combination of rolling and sliding. One roller has a diameter of 75 mm and the other has a diameter of 50 mm. They are both 200-mm long. The contact force, which is normal to the contact plane, is 18 500 N. Assuming that the coefficient of friction between the rollers is 0.33, determine the maximum tensile, compressive, and shear stresses in the rollers.

RJEŠENJA [Norton (2006), str. 988]

## Literatura

8. Alfirevic I., Sikic Z., Budin I.: Inzinjerski prirucnik IP 1 – temelji inženjerskih znanja; Školska knjiga, 1996.
  9. Decker K.-H.: Elementi strojeva, 2. izdanje; Tehnička knjiga, 1987.
  10. Elčić Z., Grubješić N., Kostelić A., Mađarević B., Oberšmit E., Račić V., Sentić B., Skalicky B., Vojta D.: Praktičar 3 – Strojarsvo 2; Školska knjiga, 1973.
  11. Jelaska D.: Elementi strojeva – skripta za studente Industrijskog inženjerstva; Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu, 2005.
  12. Kolumbić Z., Dunđer M.: Materijali v2; Odsijek za politehniku Filozofskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, 2011. <http://www.ffri.uniri.hr/~zvonimir/Materijali>
  13. Kolumbić Z., Kozak D.: Fizika – podloge za studij strojarstva; Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 2010. <http://www.sfsb.hr/~zkozum/Fizika/>
  14. Kraut B.: Strojarski priručnik, 9. izdanje; Tehnička knjiga, 1988.
  15. Pandžić J., Pasanović B.: Elementi strojeva – udžbenik s DVD-om za 2. razred tehničkih škola u području strojarstva i brodogradnje; Neodidacta, 2008.
  16. Podrug S.: Elementi strojeva – predavanja za stručni i preddiplomski studij brodogradnje; Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu, 2008.
- 
1. Albertos P., Mareels I.: Feedback and Control for Everyone; Springer, 2010.
  2. Alfirevic I., Sikic Z., Budin I.: Inzinjerski prirucnik IP 1 – temelji inženjerskih znanja; Školska knjiga, 1996.
  3. Ashby M. F., Johnson K.: Materials and Design – Engineering Materials and Processes Desk Reference; Butterworth-Heinemann, 2009.
  4. Ashby M. F., Johnson K.: Materials and Design – The Art and Science of Material Selection in Product Design; Butterworth-Heinemann, 2002.
  5. Ashby M. F., Shercliff H., Cebon D.: Materials – Engineering, Science, Processing and Design; Butterworth-Heinemann, 2007.
  6. Ashby M. F.: Materials Selection in Mechanical Design, 3<sup>rd</sup> Edition; Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
  7. Astrom K. J., Murray R. M.: Feedback Systems - An Introduction for Scientists and Engineers; Princeton University 2008.
  8. Avallone E. A., Baumeister T. Sadegh A.: Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers 11th Edition; McGraw-Hill Professional 2006.
  9. Bachman V.: Sizing Up Measurement – Activities for Grades K-2 Classrooms; Math Solutions, 2007.
  10. Baker R. C.: Flow Measurement Handbook – Industrial Designs, Operating Principles, Performance, and Applications; Cambridge University, 2000.
  11. Battikha N. E.: The Condensed Handbook of Measurement and Control, 3rd Edition; ISA 2007.
  12. Bau H. H., deRooy N. F., Kloeck B.: Sensors – A Comprehensive Survey – Volume 7 Mechanical Sensors; VCH, 2004.
  13. Bauer W.: Hydropneumatic Suspension Systems; Springer VDI, 2010.
  14. Beeby S., Ensell G., Kraft M., White N.: MEMS Mechanical Sensors; Artech House 2004.
  15. Berger H.: Automatisieren Mit SIMATIC – Controller, Software, Programmierung, Datenkommunikation, Bedienen Und Beobachten, 4. Auflage; Publics 2010.
  16. Berger J.: Klausurentrainer Technische Mechanik, 2. Auflage; Vieweg+Teubner, 2005.

17. Bishop R. H.: *Mechatronic Systems, Sensors, and Actuators - Fundamentals and Modeling*, 2nd Edition; CRC, 2008.
18. Blake A.: *Design of Curved Members for Machines*; Robert E. Krieger, 1979.
19. Böge A., Schlemmer W.: *Aufgabensammlung Technische Mechanik*, 20. Auflage; Vieweg+Teubner, 2011.
20. Böge A., Schlemmer W.: *Lösungen zur Aufgabensammlung Technische Mechanik*, 14. Auflage; Vieweg+Teubner, 2011.
21. Böge A.: *Formeln und Tabellen zur Technischen Mechanik*, 22. Auflage; Vieweg+Teubner, 2011.
22. Böge A.: *Handbuch Maschinenbau – Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik*, 20. Auflage; Vieweg+Teubner, 2011.
23. Böge A.: *Technische Mechanik: Statik – Dynamik – Fluidmechanik – Festigkeitslehre*, 29. Auflage; Vieweg+Teubner, 2011.
24. Böge A.: *Vieweg Handbuch Maschinenbau – Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik*, 18. Auflage; Vieweg, 2007.
25. Boll R., Overshott K. J.: *Magnetic Sensors, Volume 5, Sensors - A Comprehensive Survey*; Wiley-VCH, 1989.
26. Bonnick A., Newbold D.: *A Practical Approach to Motor Vehicle Engineering and Maintenance*, 3rd Edition; Butterworth-Heinemann 2011.
27. Boyes W.: *Instrumentation Reference Book*, 3rd Edition; Butterworth-Heinemann, 2003.
28. Brandt S., Dahmen H. D.: *Mechanik - Eine Einführung in Experiment und Theorie*, 4. Auflage; Springer 2005.
29. Brown H. T.: *Five Hundred and Seven Mechanical Movements - Embracing All Those Which Are Most Important*; Brown, Coombs & Co., 1871.
30. Brown T. H. Jr.: *Mark's Calculations For Machine Design*; McGraw-Hill, 2005.
31. Budynas R. G., Nisbett J. K.: *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 9<sup>th</sup> Edition; McGraw-Hill, 2011.
32. Budynas R. G., Nisbett J. K.: *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 8<sup>th</sup> Edition; McGraw-Hill, 2007.
33. Carvill J.: *Mechanical Engineer's Data Handbook*; Butterworth-Heinemann, 2003.
34. Chandsekaran V. C.: *Rubber Seals for Fluid and Hydraulic Systems*; Elsevier, 2010.
35. Chang K.-H.: *Motion Simulation and Mechanism Design with COSMOSMotion 2007*; Schroff Development Corporation, 2008.
36. Childs P.: *Mechanical Design*, 2<sup>nd</sup> Edition; Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.
37. Childs R. N.: *Practical Temperature Measurement*; Butterworth-Heinemann, 2001.
38. Czichos H., Habig K.-H.: *Tribologie - Handbuch Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik*, 3. Auflage - Studium; Vieweg+Teubner, 2010.
39. Czichos H., Hennecke M.: *Hütte – Das Ingenieurwissen* 33. Auflage; Springer, 2008.
40. Czichos H., Saito T., Smith L.: *Springer Handbook of Materials Measurement Methods*; Springer, 2006.
41. Czichos H.: *Tribology - A Systems Approach to the Science and Technology of Friction Lubrication and Wear*; Elsevier, 1978.
42. Dankert J., Dankert H.: *Statik, Festigkeitslehre, Kinematik / Kinetik*, 6. Auflage; Vieweg+Teubner, 2011.
43. Dapkunas S. J.: *Surface Engineering Measurement Standards for Inorganic Materials*; NIST, 2005.
44. Davis C. S.: *Statistical Methods for the Analysis of Repeated Measurements*; Springer, 2002.
45. Decker K.-H.: *Elementi strojeva*, 2. izdanje; Tehnička knjiga, 1987.
46. Decker K.-H.: *Elementi strojeva*, 3. izdanje; Golden marketing - Tehnička knjiga, 2006.
47. Demtröder W.: *Experimentalphysik 1 - Mechanik und Wärme*, 4. Auflage; Springer, 2006.
48. DIN – Deutsches Institut für Normung: *Klein Einführung in die DIN-Normen*, 14. Auflage; B.G.Teubner – Beuth, 2008.
49. DiStefano J. J., Stubberud A. R., Williams I. J.: *Schaum's Outline of Feedback and Control Systems*, 2nd Edition; McGraw-Hill 1994.

50. Dixon J.: The Shock Absorber Handbook, 2nd Edition; Wiley & Sons - Professional Engineering, 2007.
51. Dorf C.: The Engineering Handbook, 2nd Edition; CRC, 2004.
52. Dorf R. C., Bishop R. H.: Modern Control Systems, 12th Edition; Prentice Hall 2010.
53. Dresig H., Holzweißig F.: Maschinendynamik, 7. Auflage; Springer, 2006.
54. Dudas I.: The Theory and Practice of Worm Gear Drives; Penton 2004.
55. Dunn W. C.: Introduction to Instrumentation, Sensors, And Process Control; Artech House, 2005.
56. Elčić Z., Grubješić N., Kostelić A., Mađarević B., Oberšmit E., Račić V., Sentić B., Skalický B., Vojta D.: Praktičar 3 – Strojstvo 2; Školska knjiga, 1973.
57. Elliott B. S.: Electromechanical Devices & Components Illustrated Sourcebook; McGraw-Hill, 2007.
58. Erdmann M.: Experimentalphysik 1 - Kraft, Energie, Bewegung - Physik Denken; Springer 2011.
59. Erdmann M.: Experimentalphysik 2 - Kollision, Gravitation, Bezugssysteme - Physik Denken; AIP - Springer 2011.
60. Erdmann M.: Experimentalphysik 3 - Schwingungen, Wellen, Körperdrehung - Physik Denken; AIP - Springer 2011.
61. Eren E.: Wireless Sensors and Instruments Networks, Design, and Applications; CRC 2006.
62. Ferger J.: Messen, Steuern und Regeln mit USB und C# - Die Warriors von Code Mercenaries; Franzis, 2010.
63. Fijalkowski B. T.: Automotive Mechatronics - Operational and Practical Issues Volume II; Springer, 2011.
64. Fitney R.: Seals and Sealing Handbook, 5<sup>th</sup> Edition; Elsevier Butterworth-Heinemann, 2007.
65. Fleischer B., Theumert H.: Entwickeln Konstruieren Berechnen – Komplexe praxisnahe Beispiele mit Lösungsvarianten, 2. Auflage; Vieweg + Teubner, 2009.
66. Fraden J.: Handbook of Modern Sensors - Physics, Designs, and Applications 3rd Edition; Springer, 2004.
67. Fraden J.: Handbook of Modern Sensors - Physics, Designs, and Applications 4th Edition; Springer, 2010.
68. Frank R.: Understanding Smart Sensors, 2nd Edition; Artech House 2000.
69. Fritz A. H., Schulze G.: Fertigungstechnik; 8. Auflage; Springer, 2008.
70. Gao W.: Precision Nanometrology - Sensors and Measuring Systems for Nanomanufacturing; Springer, 2010.
71. Garrett T. K., Newton K., Steeds W.: Motor Vehicle, 13th Edition; Butterworth-Heinemann, 2001.
72. Gaura E., Newman R.: Smart Mems And Sensor Systems; ICP 2006.
73. Glegg G. L.: The Selection of Design; Cambridge University, 1972.
74. Godin B.: Measurement and Statistics on Science and Technology - 1920 to the Present; Routledge, 2005.
75. Golnaraghi F., Kuo B. C.: Automatic Control Systems, 9th Edition - Solutions Manual; 2009.
76. Golnaraghi F., Kuo B. C.: Automatic Control Systems, 9th Edition; John Wiley & Sons, 2010.
77. Golovin A., Tarabarin V.: Russian Models from the Mechanisms Collection of Bauman University; Springer, 2008.
78. Graham K. S.: Fundamentals of Mechanical Vibrations, 2nd Edition; McGraw-Hill, 2000.
79. Grote K.-H., Antonsson E. K.: Springer Handbook of Mechanical Engineering; Springer, 2009.
80. Grote K.-H., Feldhusen J.: Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau, 22. Auflage; Springer, 2007.
81. Haberhauer H., Bodenstein F.: Maschinenelemente – Gestaltung Berechnung Anwendung, 16. Auflage; Springer, 2011.
82. Haberhauer H., Bodenstein F.: Maschinenelemente – Gestaltung, Berechnung, Anwendung, 15. Auflage; Springer, 2009.
83. Hall A. S., Holowenko A. R., Laughlin H. G.: Schaum's Outline of Theory and Problems of Machine Design; McGraw-Hill, 1968.
84. Harris C. M., Piersol A. G.: Harris' Shock and Vibration Handbook, 5th Edition; McGraw-Hill, 2001.
85. Hebra A. J.: The Physics of Metrology - All about Instruments - From Trundle Wheels to Atomic Clocks; Springer 2010.
86. Hering E., Schröder B.: Springer Ingenieurtabellen; Springer, 2004.



87. Hesse S., Schnell G.: Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation - Funktion - Ausführung - Anwendung - Praxis, 4. Auflage; Vieweg+Teubner, 2009.
88. Higuchi T., Suzunori K., Tadokoro S.: Next-Generation Actuators Leading Breakthroughs; Springer, 2010.
89. Hofmann P.: Hybridfahrzeuge - Ein alternatives Antriebskonzept für die Zukunft; Springer, 2010.
90. Jackson R. G.: Novel Sensors and Sensing; IOP, 2004.
91. James K.: PC Interfacing and Data Acquisition - Techniques for Measurement Instrumentation and Control; Newnes, 2000.
92. Jelaska D.: Elementi strojeva – skripta za studente Industrijskog inženjerstva; Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu, 2005.
93. Jones F. D., Horton H. L., Newell J. A.: Ingenious Mechanisms for Designers and Inventors - Volume 1; Industrial Press, 1930.
94. Jones F. D., Horton H. L., Newell J. A.: Ingenious Mechanisms for Designers and Inventors - Volume 3; Industrial Press, 1930.
95. Jones F. D., Horton H. L., Newell J. A.: Ingenious Mechanisms for Designers and Inventors - Volume 4; Industrial Press, 1930.
96. Jones F. D., Horton H. L., Newell J. A.: Ingenious Mechanisms for Designers and Inventors - Volume 2; Industrial Press, 1930.
97. Kato N., Kamimura S.: Bio-mechanisms of swimming and flying: fluid dynamics, biomimetic robots, and sports science; Springer, 2008.
98. Kiencke U., Nielsen L.: Automotive Control Systems - For Engine, Driveline, and Vehicle, 2nd Edition; Springer, 2005.
99. Kilian C. T.: Modern Control Technology - Components and Systems, 2nd Edition; Delmar Thomson Learning, 2000.
100. Kirchner E.: Leistungsübertragung in Fahrzeuggetrieben Grundlagen der Auslegung, Entwicklung und Validierung von Fahrzeuggetrieben und deren Komponenten; Springer, 2007.
101. Klebanov B. M., Barlam D. M., Nystrom F. E.: Machine Elements – Life and Design; CRC Taylor & Francis Group, 2008.
102. Kolumbić Z., Dunder M.: Materijali v2; Odsjek za politehniku Filozofskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, 2011. <http://www.ffri.uniri.hr/~zvonimir/Materijali>
103. Kolumbić Z., Kozak D.: Fizika – podloge za studij strojarstva; Strojarski fakultet u Slavenskom Brodu Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 2010. <http://www.sfsb.hr/~zkolum/Fizika/>
104. König H.: Maschinen im Baubetrieb – Grundlagen und Anwendung 2. Auflage; Vieweg+Teubner, 2008.
105. Kraut B.: Strojarski priručnik, 9. izdanje; Tehnička knjiga, 1988.
106. Kreith F., Goswami D. Y.: The CRC Handbook of Mechanical Engineering, 2<sup>nd</sup> Edition; CRC 2005.
107. Künne B.: Köhler Röggnitz Maschinenteile Vol 1, 10. Auflage; Vieweg + Teubner, 2008.
108. Künne B.: Köhler Röggnitz Maschinenteile Vol 2, 10. Auflage; Vieweg + Teubner, 2008.
109. Kutz M.: Mechanical Engineers' Handbook – Four Volume Set, 3rd Edition – Volume 1: Materials and Mechanical Design; Wiley, 2005.
110. Kutz M.: Mechanical Engineers' Handbook – Four Volume Set, 3rd Edition – Volume 2: Instrumentation, Systems, Controls, and MEMS; Wiley, 2005.
111. Kutz M.: Mechanical Engineers' Handbook – Four Volume Set, 3rd Edition – Volume 3: Manufacturing and Management; Wiley, 2005.
112. Kutz M.: Mechanical Engineers' Handbook – Four Volume Set, 3rd Edition – Volume 4: Energy and Power; Wiley, 2005.
113. LearningExpress: 501 Measurement and Conversion Questions; LearningExpress, 2004.
114. Leckie F. A., Dal Bello D. J.: Strength and Stiffness of Engineering Systems; Springer, 2009.
115. Lerch R.: Elektrische Messtechnik - Analoge, digitale und computergestützte Verfahren, 3. Auflage; Springer 2006.
116. Lerch R.: Elektrische Messtechnik - Analoge, digitale und computergestützte Verfahren; Springer-Lehrbuch, 2010.
117. Levine W. S.: The Control Handbook - Control System Fundamentals, 2nd Edition; CRC 2011.

118. Lingaiah K.: Machine Design Databook, 2<sup>nd</sup> Edition; McGraw-Hill, 2002.
119. Liptak B. G.: Instrument Engineers' Handbook - Volume 1 Process Measurement and Analysis, 4th Edition; CRC, 2003.
120. Lobontiu N.: Compliant Mechanisms - Design of Flexure Hinges; CRC, 2002.
121. Lotter B., Wiendahl H.-P.: Montage in der industriellen Produktion – Ein Handbuch für die Praxis; Springer, 2006.
122. Lunze J.: Regelungstechnik 1 - Systemtheoretische Grundlagen Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen, 8. Auflage; Springer, 2010.
123. Lunze J.: Regelungstechnik 2 - Mehrgrössensysteme, Digitale Regelung, 6. Auflage; Springer, 2010.
124. Lurie B. J., Enright P. J.: Classical Feedback Control - With MATLAB; Marcel Dekker, 2000.
125. Mabie H. H., Reinholtz C. F.: Mechanisms and dynamics of machinery, 4th Edition; John Wiley & Sons, 1987.
126. Mancuso J. R.: Couplings and Joints – Design, Selection and Application; Marcel Dekker, 1999.
127. Mandal A. K.: Introduction to Control Engineering - Modeling, Analysis, and Design; New Age International, 2006.
128. Marek J., Trah H.-P., Suzuki Y., Yokomori W.: Sensors Applications - Volume 4 Sensors for Automotive Technology; Wiley-VCH 2003.
129. Marghitu D. B.: Mechanical Engineer's Handbook; Academic Press, 2001.
130. Marghitu D. B.: Mechanisms and Robots Analysis with MATLAB; Springer, 2009.
131. McCarthy M. J., Soh G. S.: Geometric Design of Linkages, 2nd Edition; Springer 2010.
132. McGraw Hill: McGraw Hill – Encyclopedia of Science & Technology - 19 Volume set, 10th Edition; McGraw-Hill Professional, 2007.
133. Meissner M., Schorcht H.-J.: Metallfedern - Grundlagen, Werkstoffe, Berechnung, Gestaltung und Rechneinsatz, 2. Auflage; Springer, 2007.
134. Meixner H.: Micro- and Nanosensor Technology-Trends in Sensor Markets, Volume 8, Sensors - A Comprehensive Survey; Wiley-VCH, 1995.
135. Mims F. M.: Engineer's Mini Notebook - Sensor Projects; Siliconconcept, 1996.
136. Morris A. S.: Measurement and Instrumentation Principles, 3rd Edition; Butterworth-Heinemann, 2001.
137. Mott R. L.: Machine Elements in Mechanical Design, 4<sup>th</sup> Edition; Prentice Hall, 2004.
138. Mühl T.: Einführung in die elektrische Messtechnik - Grundlagen, Messverfahren, Geräte, 2. Auflage; Teubner Verlag, 2001.
139. Muhs D., Wittel H., Jannasch D., Becker M., Voßiek J.: Roloff/Matek Maschinenelemente – Interaktive Formelsammlung auf CD-ROM, 8. Auflage; Vieweg, 2006.
140. Nawrocki W.: Measurement Systems And Sensors; Artech House, 2005.
141. Neale M.: The Tribology Handbook, 2nd Edition; Butterworth-Heinemann, 1999.
142. Niemann G., Winter H., Höhn B.-R.: Maschinenelemente – Band 1 – Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen, 4. Auflage; Springer, 2005.
143. Norton R. L.: Design of Machinery – An Introduction to the Synthesis and Analysis of Mechanisms and Machines, 2<sup>nd</sup> Edition; WCB/McGraw-Hill, 1999.
144. Norton R. L.: Design of Machinery - An Introduction to the Synthesis an Analysis of Mechanisms and Machines, 3rd Edition; McGraw-Hill, 2003.
145. Norton R. L.: Machine Design – An Integrated Approach, 3<sup>rd</sup> Edition; Prentice Hall, 2006.
146. Nyce D. S.: Linear Position Sensors - Theory and Application; John Wiley & Sons, 2004.
147. Oberg E., Jones F. D., Horton H. L., Ryffel H. H.: Machinery's Handbook 28<sup>th</sup> Edition; Industrial Press, 2008.
148. Ogata K.: Modern Control Engineering, 4th Edition; Pearson Education International, 2002.
149. Orlowski P. F.: Praktische Regeltechnik - Anwendungsorientierte Einführung für Maschinenbauer und Elektrotechniker, 8. Auflage (VDI); Springer, 2009.
150. Orlowski P. F.: Praktische Regeltechnik - Anwendungsorientierte Einführung für Maschinenbauer und Elektrotechniker, 9. Auflage (VDI); Springer, 2011.

151. Pandžić J., Pasanović B.: Elementi strojeva – udžbenik s DVD-om za 2. razred tehničkih škola u području strojarstva i brodogradnje; Neodidacta, 2008.
152. Parmley R. O.: Machine Devices and Components Illustrated Sourcebook; McGraw-Hill, 2005.
153. Parthier R.: Messtechnik - Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik für alle technischen Fachrichtungen und Wirtschaftsingenieure, 4. Auflage; Vieweg & Sohn, 2008.
154. Pawlak A. M.: Sensors and Actuators in Mechatronics - Design and Applications; CRC, 2007.
155. Paz E. B., Ceccarelli M., Otero J. E., Sanz J. L. M.: A Brief Illustrated History of Machines and Mechanisms; Springer, 2010.
156. Pernerer R.: Handbuch Zahnriementechnik - Grundlagen, Berechnung, Anwendungen; Springer, 2009.
157. Petruzzellis T.: Electronics Sensors for the Evil Genius - 54 Electrifying Projects; McGraw-Hill 2006.
158. Pisla D., Ceccarelli M., Husty M., Corves B.: New Trends in Mechanism Science - Analysis and Design; Springer, 2010.
159. Placko D.: Fundamentals of Instrumentation and Measurement (Instrumentation and Measurement Series); ISTE, 2007.
160. Podrug S.: Elementi strojeva – predavanja za stručni i preddiplomski studij brodogradnje; Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu, 2008.
161. Polak T. A., Pande C.: Engineering Measurements - Methods and Intrinsic Errors; Professional Engineering Publishing Limited 1999.
162. Pons J. L.: Emerging Actuator Technologies - A Micromechatronic Approach; John Wiley & Sons, 2005.
163. Ramesh K. T.: Nanomaterials - Mechanics and Mechanisms; Springer, 2009.
164. Regtien P. P. L., van der Heijden F., Korsten M. J., Otthius W.: Measurement Science for Engineers; Elsevier Science & Technology, 2004.
165. Reif K.: Bosch Autoelektrik und Autoelektronik - Bordnetze Sensoren und elektronische Systeme, 6. Auflage; Vieweg+Teubner, 2011.
166. Reif K.: Konventioneller Antriebsstrang und Hybridantriebe - mit Brennstoffzellen und alternativen Kraftstoffen; Vieweg+Teubner, 2010.
167. Reif K.: Sensoren im Kraftfahrzeug; Vieweg+Teubner, 2010.
168. Ripka P., Tipek A.: Modern Sensors Handbook; ISTE, 2007.
169. Roberts D.: Making Things Move DIY Mechanisms for Inventors, Hobbyists, and Artists; McGraw-Hill/TAB Electronics, 2010.
170. Rothbart H.: The CAM Design Handbook; McGraw-Hill, 2004.
171. Sacks E. J., Joskowicz L.: The Configuration Space Method for Kinematic Design of Mechanisms; MIT, 2010.
172. Salkind N. J., Rasmussen K.: Encyclopedia of Measurement and Statistics, 2 Volume Set; Sage, 2007.
173. Sandin P. E.: Robot Mechanisms and Mechanical Devices Illustrated; McGraw-Hill, 2003.
174. Sauter B.: Messen, Steuern, Regeln mit USB; Franzis, 2010.
175. Savaresi S. M., Poussot-Vassal C., Spelta C., Sename O., Dugard L.: Semi-Active Suspension Control Design for Vehicles; Butterworth-Heinemann, 2010.
176. Scholz J., Ricolfi T.: Thermal Sensors, Volume 4, Sensors: A Comprehensive Survey; Wiley-VCH, 1990.
177. Sclater N., Chironis N. P.: Mechanisms and Mechanical Devices Sourcebook, 4th Edition; McGraw-Hill Professional, 2006.
178. Scott D. M.: Industrial Process Sensors; CRC, 2008.
179. Shigley J. E., Mischke C. R.: Standard handbook of machine design, 2<sup>nd</sup> Edition; McGraw-Hill Professional, 1996.
180. Shigley J. E., Mischke C. R.: Standard handbook of machine design, 3<sup>rd</sup> Edition; McGraw-Hill Professional, 2004.
181. Shigley J. E., Uicker J. J.: Theory of Machines and Mechanisms, McGraw Hill Higher Education, 1980.
182. Sinclair I. R.: Sensors and Transducers, 3rd Edition; Newnes, 2001.

## 92 Elementi strojeva 2

183. Singh U. K., Dwivedi M.: Problems and Solutions in Mechanical Engineering; New Age International, 2007.
184. Smith C. A., Corripio A. B.: Principles and Practice of Automatic Process Control, 2nd Edition; John Wiley & Sons, 1997.
185. Smith E. H.: Mechanical Engineer's Reference Book 12th Edition; Butterworth-Heinemann, 2000.
186. Sobey E.: A Field Guide to Automotive Technology; Chicago Review, 2009.
187. Sobey E.: A Field Guide to Household Technology; Chicago Review, 2006.
188. Society of Automotive Engineers: Spring Design Manual Ae-11; Society of Automotive Engineers 1970.
189. Soloman S.: Sensors and Control Systems in Manufacturing, 2nd Edition; McGraw-Hill, 2010.
190. Spotts M. F.: Design of Machine Elements; 3<sup>rd</sup> Edition; Prentice Hall, 1961.
191. Stachowiak G. W., Batchelor A. W.: Engineering Tribology, 2nd Edition; Butterworth-Heinemann, 2000.
192. Stachowiak G. W., Batchelor A. W.: Engineering Tribology, 3rd Edition; Elsevier - Butterworth-Heinemann, 2005.
193. Stachowiak G. W., Batchelor A. W.: Engineering Tribology; Elsevier, 1993.
194. Steinhilper W., Sauer B.: Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1 – Grundlagen der Berechnung und Gestaltung von Maschinenelementen, 7. Auflage; Springer, 2008.
195. Steinhilper W., Sauer B.: Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2 – Grundlagen von Maschinenelementen für Antriebsaufgaben, 6. Auflage; Springer, 2008.
196. Steyer R., Eid M.: Messen und Testen - Mit Übungen und Lösungen, 2. Auflage; Springer-Lehrbuch, 2000.
197. Stolarski T.A.: Tribology in Machine Design; Butterworth-Heinemann, 1990.
198. Strothman J.: ISA Handbook of Measurement Equations and Tables, 2nd Edition; ISA, 2006.
199. Šurina T.: Automatska regulacija, 3. izdanje; Školska knjiga, 1987.
200. Takadoun J.: Materials and Surface Engineering in Tribology; ISTE, Wiley, 2008.
201. ten Hompel M., Büchter H., Franzke U.: Identifikationssysteme und Automatisierung (VDI); Springer, 2008.
202. Thomas M.: Einführung in die elektrische Messtechnik - Grundlagen, Messverfahren, Geräte, 2. Auflage; Teubner 2006.
203. Timings R.: Mechanical Engineer's Pocket Book, 3rd Edition; Newnes, 2005.
204. Tompkins - Interfacing Sensors to the IBM-PC 0134690818 1998
205. Tönshoff I. I.: Sensors Applications - Volume 1 Sensors in Manufacturing; Wiley-VCH 2001.
206. Totten G. E., Liang H.: Mechanical Tribology - Materials Characterization and Applications; Marcel Dekker, 2004.
207. Totten G. E.: Handbook of Lubrication and Tribology - Volume I Application and Maintenance, 2nd Edition; CRC, 2006.
208. Tremayne D.: The Science of F1 Race-Car Design - Expert Analysis of the Anatomy of the Modern Grand Prix Car; Heynes Publishing, 2004.
209. Trzesniowski M.: Rennwagentechnik – Grundlagen, Konstruktion, Komponenten, Systeme, 2. Auflage; Vieweg + Teubner, 2010.
210. Tumanski S.: Principles of Electrical Measurement; CRC, 2006.
211. Ulbrich H., Weidemann H.-J., Pfeiffer F.: Technische Mechanik in Formeln Aufgaben und Lösungen; Teubner, 2006.
212. van Basshuysen R.: Fahrzeugentwicklung im Wandel- Gedanken und Visionen im Spiegel der Zeit - Populär; Vieweg + Teubner, 2010.
213. Vepa R.: Biomimetic Robotics - Mechanisms and Control; Cambridge University, 2009.
214. Vinogradov O.: Fundamentals of Kinematics and Dynamics of Machines and Mechanisms; CRC, 2000.
215. Vitas D. J., Trbojevic M. D.: Masinski elementi I, 10. izdanje; Naucna knjiga, 1990.
216. Vitas D. J., Trbojevic M. D.: Masinski elementi II, 9. izdanje; Naucna knjiga, 1988.
217. Vitas D. J., Trbojevic M. D.: Masinski elementi III, 4. izdanje; Naucna knjiga, 1978.

218. Vöth S.: Maschinenelemente Aufgaben und Lösungen - Festigkeit, Verbindungen, Antriebe; Teubner, 2007.
219. Wagner E., Dändliker R., Spenner K.: Optical Sensors, Volume 6, Sensors - A Comprehensive Survey; Wiley-VCH, 1991.
220. Walsh R. A.: Electromechanical Design Handbook, 3rd Edition; McGraw-Hill, 2000.
221. Webster J. G.: The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook on CD-ROM; CRC, 1999.
222. Weck M., Brecher C.: Werkzeugmaschinen - 4 Automatisierung von Maschinen und Anlagen, 6. Auflage; Springer, 2006.
223. Whitney D. E.: Mechanical Assemblies: Their Design, Manufacture, and Role in Product Development; Oxford University Press, 2004.
224. Wilson J. S.: Sensor Technology Handbook; Elsevier - Newnes, 2005.
225. Wittel H., Muhs D., Jannasch D., Voßiek J.: Roloff/Matek Maschinenelemente – Aufgabensammlung – Aufgaben, Lösungshinweise, Ergebnisse, 14. Vieweg + Teubner, 2010.
226. Wittel H., Muhs D., Jannasch D., Voßiek J.: Roloff/Matek Maschinenelemente – Lehrbuch und Tabellenbuch – Normung, Berechnung, Gestaltung, 19. Auflage; Vieweg + Teubner, 2009.
227. Wittel H., Muhs D., Jannasch D., Voßiek J.: Roloff/Matek Maschinenelemente – Normung, Berechnung, Gestaltung, 20. Auflage; Vieweg + Teubner, 2011.
228. Xue D., Chen Y.-Q., Atherton D. P.: Linear Feedback Control - Analysis and Design with MATLAB; SIAM, 2001.
229. Yamasaki H.: Handbook of Sensors and Actuators - Volume 3 Intelligent Sensors; Elsevier, 1996.
230. Youden W. J.: Experimentation and Measurement; DoC, TA, NIST, 1997.
231. Yurish S. Y., Smart Sensors and MEMS; Kluwer, 2004.
232. Zacher S., Reuter M.: Regelungstechnik für Ingenieure - Analyse Simulation und Entwurf von Regelkreisen, 13. Auflage; Vieweg + Teubner, 2011.