

Razvoj in pomen tribologije doma in v svetu

Tribology Research, Trends and Future Directions

J. Vizintin, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Katedra za konstruiranje, Laboratorij za tribologijo

Tribologija je nauk o trenju, obrabi in mazanju. Trenje in obraba se pojavljata znotraj tribološkega sistema, ki je sestavljen iz dveh trdnih teles, vmesnega medija in okolice.

V prispevku je najprej opisan kratek pregled razvoja trenja in obrabe skozi različna zgodovinska obdobja. Nato je prikazan gospodarski pomen tribologije s stališča prihranka energije in materiala v pogonskih in delovnih sistemih. Opisani so vsi parametri, ki vplivajo na trenje in obrabo, podani so tudi postopki za izračun trenja in obrabe pri različnih triboloških modelih. Na koncu prispevka je podan kratek pregled nalog, ki nas čakajo v prihodnosti na področju tribologije.

It is now generally recognized that friction and wear are not "intrinsic material properties" but rather the characteristics of the pertinent "tribological system", consisting generally of four material components: a pair of solids, an interfacial medium and an environmental atmosphere.

In this paper a short historical development of friction and wear as well as the problems of friction energy losses and wear materials losses in the design of dynamic mechanical systems are described. The main properties of solids which influence friction and wear are discussed and published rules which relate material properties to friction and wear are considered. Finally, a frame-work for further development and experimental friction and wear investigations is given.

1 Kratak zgodovinski pregled pomembnih dosežkov s področja trenja in mazanja

Trenje je naravni pojav, ki spremlja razvoj človeštva od kamene dobe (3500 pred n.št.), ko je človek s trenjem naredil ogenj, do danes. Že v prazgodovini po letu 3500 pred n.št. so (Sumerijci in Egipčani) vrtali luknje s trenjem. Iz tega obdobja so se ohranili kamniti drsni ležaji, ki so jih uporabljali za lončarske stroje. Kot mazivo so uporabljali vodo. V tistem obdobju so na zanimiv način reševali probleme pri transportu težkih kipov. Izdelali so sanke, ki so jih nato vleкли po prej pripravljenih poteh, politih z vodo, ki jim je služila kot mazivo. Poznali so tudi vozila, ki so imela z usnjem obložene ležaje, sama kolesa pa so bila po obodu obložena z bakrenimi nastavki, ki so varovali les pred preveliko obrabo. Že v tistem času so spoznali, da je odpor pri gibanju manjši pri kotalnem kot pri drsnem trenju, zato so pod sani podstavljali okrogle palice. Da so že v tistem času poznali tudi druga maziva nam dokazuje tudi klinopis.

Obdobje med letom 900 pred n.št. do leta 400 po n.št. (grško-rimsko obdobje) je pomembno za razvoj na področju drsnih ležajev, mehanskih pogonov in za začetek razvoja kotalnih ležajev. Prvič so bile uporabljene bronaste puše za drsne ležaje. Razvit je bil sistem kolo-os, ki je odprl razvoj vozov kot prevoznih sredstev. V tem obdobju so spoznali tudi, da imajo površine mazane z živalskimi mastmi in olji manjše trenje.

V času renesanse (1450–1600) izstopa Leonardo da Vinci (1452–1512) s svojimi raziskavami, med ostalimi, tudi na področju trenja. Prvi je definiral, da je sila trenja odvisna od obremenitve in neodvisna od izgleda dotikalne površine. Ugotovil je, kar se je kasneje izkazalo kot napačno, da je razmerje med silo trenja in pritiskno silo za drsne pare $1/4$. Ločil je drsno od kotalnega trenja. Razisko-

val je delovanje maziv za zmanjšanje trenja. Leonardo da Vinci je izdelal tudi ležajno kovino, ki je bila sestavljena iz treh delov bakra in sedem delov kositra. Ukvarjal se je tudi s študijem obrabe v drsnih ležajih. V začetku industrijske revolucije (1600–1750) je najbolj izstopal Robert Hooke, ki je opravil prve eksperimente z valjanjem cilindra po ravnini. Ugotovil je, da je deformacija proporcionalna sili in da je kotalni odpor odvisen od deformacije in adhezije. Guillaume Amontons je eksperimentiral z drsnimi pari iz železa, bakra, svinca in lesa, ki so bili mazani z živalskimi maščobami. Ugotovil je, ne da bi poznal dela Leonarda da Vincija, da je sila trenja odvisna od pritiskne sile in da je neodvisna od geometrijske dotikalne površine. Prav tako je ugotovil, da je razmerje med silo trenja in pritiskno silo $1/4$. Delo je predložil francoski Akademiji znanosti, ki pa mu je delo zavrnila.

Leonard Euler (1707–1783) je opravil preizkuse z hrpavo površino, ki jo je simuliral z obliko trikotnika. Študiral je razliko med statičnim in kinematičnim trenjem. Isaak Newton je v letih (1642–1727) definiral viskoznost kot notranje trenje v gibajočem mediju. Ta definicija je v veljavi še danes.

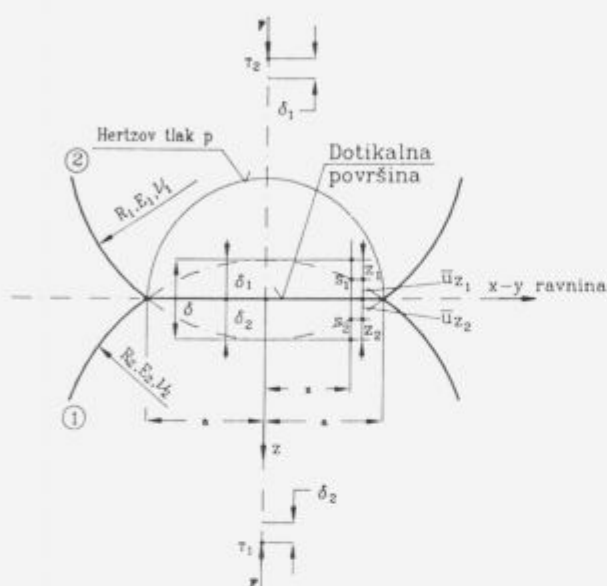
V času industrijske revolucije (1750–1850) je predvsem Charles Augustin Coulomb sistematično raziskoval drsno in kotalno trenje. Leta 1780 je prijavil francoski Akademiji znanosti raziskavo, ki je v bistvu definirala zakon o trenju v naslednjih točkah:

1. sila trenja je odvisna od pritiskne sile,
2. sila trenja je neodvisna od geometrijske dotikalne površine.

Tak zakon o trenju se je v bistvu in skoraj v celoti nespremenjen ohranil do sredine tega stoletja kot Coulombov

zakon. Couloumb je razlikoval trenje pri mirovanju in pri gibanju ter se tudi aktivno ukvarjal z raziskavami obrabe.

V obdobju (1850–1925), ki ga imenujemo tudi 75 let tehničnega napredka, je deloval med drugimi tudi Heinrich Rudolph Herz. Postavil je teorijo za izračun napetosti in deformacije v obremenjenem kontaktu pri popolni elastični deformaciji. Še danes je ta teorija poznana kot Hertzova teorija, ki jo v osnovi ponazarjajo enačbe, ki so prikazane na sliki 1.



$$P_0 = \left[\frac{F E^*}{\pi R} \right]^{1/2}, \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$P = P_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \quad E^* - \text{skupni elastični modul}$$

$$2a = 2.14 \sqrt{\frac{F_N R}{E^*}}$$

Slika 1. Hertzova teorija (1881).

Osnovo za matematičen popis hidrodinamičnega mazanja sta s svojo enačbo postavila Navir in Stokes leta 1823/1845. Osborne Reynolds je na osnovi spoznanj in meritev, ki jih je leta 1883 opravil Beauchamp Tower, izdelal leta 1886 teoretične osnove in predlagal enačbo za popis hidrodinamičnega efekta. Ta enačba je še danes v uporabi. Teoretične izsledke Reynoldsa je za izračun radialnih drsnih ležajev uporabil Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld leta 1904, za aksialne ležaje pa Michell v Avstraliji in od njega neodvisno Kingbury v Angliji. Teorijo o hidrodinamičnem mazanju je z natančnimi meritvami trenja na drsnem ležaju potrdil Richard Stribeck leta 1902. Dejanski hidrodinamični tlak direktno v drsnem ležaju je bil prvič izmerjen leta 1916, klasična teorija hidrodinamičnega mazanja pa je bila uporabljena tudi za zobnike.

Na področju suhega trenja se je delo nadaljevalo predvsem po zaslugi Goodmana, ki je leta 1886 pojasnil fenomene suhega trenja s strukturo dotikalne površine. Ugotovil je, da je trenje med enakimi materiali večje kot med različnimi. To spoznanje velja še danes.

V tem času so tudi prvič sistematično obdelali problem mešanega trenja ter pomen površinskih tankih filmov, ki

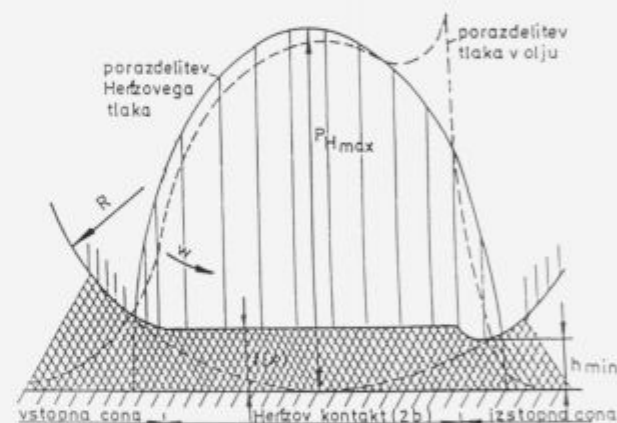
nastanejo na dotikalni površini na podlagi kemične oziroma fizikalne reakcije. Hardy je leta 1922 postavil tudi model, s katerim je pojasnil mehanizem nastanka mazalnih plasti.

Obdobje od leta 1925 do danes lahko predstavimo s področji na katerih se je izživila večina raziskovalcev. Ta področja so:

- suho trenje,
- kotalno trenje,
- materiali za ležaje,
- kotalni ležaji,
- drsni ležaji, hidrodinamični ležaji, plinski ležaji,
- mazalna sredstva.

Rezultati, ki jih je potrebno posebej poudariti, so:

- proučevanje Reynolds-ove diferencialne enačbe s poudarkom na porazdelitvi hidrodinamičnega tlaka za drsne ležaje z omejeno dolžino,
- G. Vogelpohlova enačba za izračun kritičnega števila vrtiljajev pri drsnih ležajih,
- razvoj teorije elasto-hidrodinamičnega mazanja s poudarkom na izračunu minimalne debeline oljnega filma (slika 2). Teorijo sta razvila Dowson in Higginson leta 1966.



F_N (N)	$P_H \max$ (N/mm ²)	$2b$ (mm)	$f(x) \min$ (mm)
250	12387	0.26	0.000056
1000	24775	0.52	0.000225
2000	35037	0.72	0.00045

Slika 2. Porazdelitev tlaka pri EHD mazanju.

2 Novo obdobje razvoja trenja, obrabe in mazanja—tribologija

Po letu 1960 so v razvitem svetu že čutili problem preskrbe z energijo in osnovnimi surovinami. Zato je veliko raziskovalnih in razvojnih institucij pričelo s študijami o tem, kako, kje in na kakšen način bi bilo mogoče prihraniti energijo in surovine.

Tako je leta 1966 Peter Jost predložil Britanskemu ministrstvu za izobraževanje in znanost poročilo: "Lubrication—A Report of the Present Position and

Področja	S trenjem mazani deli	Izgube skupaj	Obraba mazani deli	Skupaj	Mazani deli	
Oskrba z energijo in vodo	1.058-1.575	1.916	1.61	2.974-3.491	2.678-3.195	
Industrija	1.598-2.703	14.30	6.77	15.896-17.003	8.368-9.473	
Promet	8.141-14.457	11.06	9.24	19.201-25.517	17.381-23.697	IZGUBE
Stanovanja	0.047-0.094	0.16	0.10	0.207-0.254	0.147-0.194	
Ostalo	0.188-0.494	4.80	3.20	4.958-5.294	3.368-3.694	
Skupaj	11.032-19.323	32.236	20.93	43.268-51.559	31.962-40.253	

Letne skupne izgube zaradi trenja in obrabe v ZRN v Mrd. DM (Osnova 1 kWh = 0.235 DM; 1 liter goriva = 1.00 DM)

Področja v železarni	Močni prihranki 1. stopnja Mio. DM	2. stopnja Mio. DM
Oddelki za sintranje	5.3-10.5	11
Visoke peči	26.7-31.5	16
Valjanje	48-68	43-63
Skupaj	80-110	70-90

Močni prihranki v železarnah v ZRN

Področje	Prihranek (Mrd. DM)
Energija	0.2390
Industrija	0.2990
Promet (mazani deli)	2.3953
Promet (brez mazanja)	3.4660
Skupaj	6.3983

Realni letni prihranek energije z uporabo znanja iz tribologije v ZRN

Področje	Prihranek (Mio. \$)
Promet	332 - 501
Industrija	135.05 - 215.85
Obdelava kovin	70 - 140
Zamenjava delov in vzdrževanje	23.75 - 26.05
Stanovanja	80 - 120
Skupaj	548 - 837

Močni prihranki energije z uporabo znanja iz tribologije v Veliki Britaniji (1980/81).

Področje	Prihranek energije Poraba energije v %	Mrd. \$ letno
Promet	7.4	11.00
Industrija	0.7	1.05
Proizvodnja energije	2.8	4.20
Skupaj	10.9	16.25

Močni prihranki energije z uporabo znanja iz tribologije v ZDA (1980/81)

Slika 4. Ocena prihrankov v ZRN, Veliki Britaniji in ZDA, če bi upoštevali znanje iz tribologije (1980/81).

	Mio. £ / leto
Zmanjšanje porabe energije pri manjšem trenju	28
Manjše angažiranje delavcev	10
Prihranek maziv	10
Zmanjšanje zastojev	230
Zmanjšanje investicij	115
Boljši izkoristek delovnih sredstev	22
Prihranek pri investicijah zaradi daljše življenske dobe	100
	515

Če upoštevamo 1£ = 11DM potem je izguba 5.7Mrd DM / leto

Slika 3. Ocena prihrankov v Veliki Britaniji, če bi upoštevali znanje iz tribologije (1966/67).

Industrie's Needs", v katerem ugotavlja, da so problemi trenja interdisciplinarni in da je mogoče z znanjem s področja trenja, obrabe in mazanja prihraniti veliko energije in surovin (slika 3). Predložil je tudi, da bi se znanost, ki se ukvarja s proučevanjem trenja, obrabe in mazanja poimenovala s skupnim imenom TRIBOLOGIJA. Ime je prevzel iz grščine—TRIBOS, ki pomeni nauk o trenju in mazanju. Skupno ime ni prevzela samo Anglija, ampak tudi vse druge razvite industrijske dežele sveta. Danes se to ime uporablja v vseh deželah sveta in predstavlja znanost o trenju, obrabi in mazanju.

Razvoj tribologije v razvitih industrijskih deželah so pospešile:

1. odvisnost razvitih držav od posameznih kovin in energije,
2. ocena možnih prihrankov energije v več državah

razvitega sveta (ZRN, GB, USA), (slika 4) in

3. razvoj zanesljivih in trajnih delovnih in pogonskih strojev ter vesoljska tehnika.

Zanesljivost tehničnih sistemov je mogoče doseči s pravilnim dimenzioniranjem, natančno izdelavo in pravilnim vzdrževanjem. Tehnični sistemi, ki služijo za prenos moči, materiala oziroma informacije so sestavljeni iz strukture sistema ter vhodnih in izhodnih parametrov. Iz sistema se v okolico odvajajo izgube sistema. Kot primer tehničnega sistema si oglejmo tovornjak, slika 5. Dimenzioniranje elementov strukture tehničnega sistema izdelamo po principih mehanike in trdnosti. Pri dimenzioniranju upoštevamo, da se celotna moč, ki se prenaša preko elementov strukture sistema, v našem primeru zobnikov menjalnika, prenese na dotikalno površino, ki je enaka velikosti geometrijske površine v dotiku. Za elemente strukture sistema, ki se gibljejo z relativno hitrostjo (zobniški par, kotalni ležaji...) v enačbah za dimenzioniranje upoštevamo še z eksperimenti dobljene koeficiente, ki upoštevajo razmere, ki vladajo v tribološkem kontaktu. Ti koeficienti so empirični.

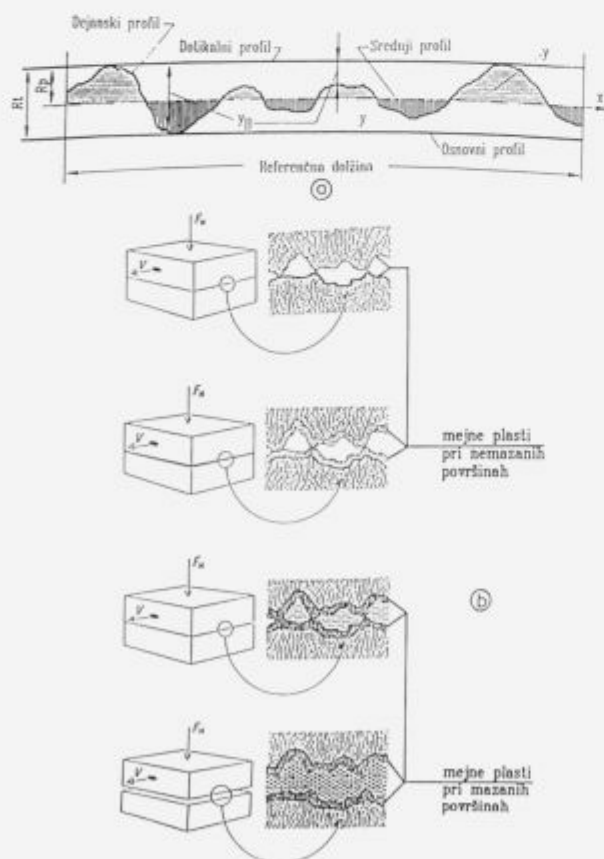
Tribološki kontakt, v katerem se dejansko prenaša celotna moč, je definiran s standardom DIN 50320. Na dotikalni površini v tribološkem kontaktu se generirata trenje in obraba. Trenje se v celoti pretvori v toploto, obraba pa vpliva na spremembo dimenzij izdelka kot celote. Oba procesa potekata istočasno. Mehanizmi, v katerih potekata oba procesa pa so različni. Med procesoma lahko nastopi en sam ali pa več mehanizmov hkrati. Mehanizmi, ki lahko nastopijo so: adhezija, abrazija, utrujanje, erozija, deformacija in tribooksidacija.

Topografija tehnične dotikalne površine v tribološkem kontaktu ni ravna in gladka, ampak je naključno hrapava in

Kategorija	Označba preizkusa	Simbol
I	v pogonu	
II	na preizkuševališču	
III	preizkus agregata pogona na preizkuševališču	
IV	modelni agregat	
V	preizkus na osnovnem elementu	
VI	modelni preizkus s poenostavljenimi preizkušanci	

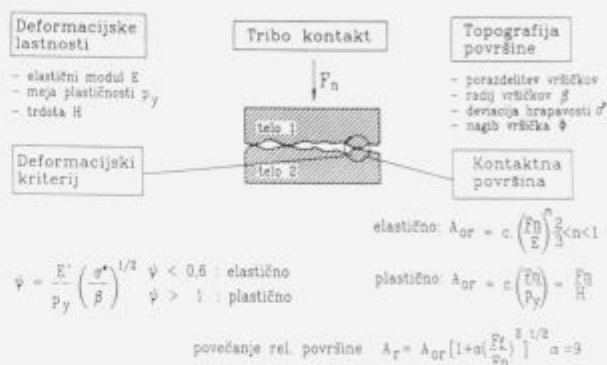
Slika 5. Kategorije triboloških raziskav na primeru tovornjaka.

valovita. (slika 6a) Vršiči hrapave površine so prevlečeni z mejnimi plastmi, ki so različne za površino z in brez prisotnosti maziva. Kako izgledajo mejne plasti v različnih triboloških kontaktih prikazuje slika 6b.



Slika 6. a) Dejanski profil tehnične površine. b) Vrste dotika v tribološkem kontaktu.

Dotik dveh elementov v tribološkem kontaktu se izvrši na realni dotikalni površini. Celotna moč, ki vstopa v tehnični sistem, se prenaša preko realne dotikalne površine, ki je manjša od geometrijske površine. Realna dotikalna površina je sestavljena iz mnogih mikro dotikalnih površin, ki se tvorijo na vršičkih hrapave površine. Vršički se pri delovanju normalne in tangencialne sile elastično ali plastično deformirajo (slika 7). Osnovne lastnosti, ki so pomembne za določitev realne dotikalne površine lahko delimo v dve skupini: deformacijske lastnosti vršička in topografske karakteristike površine. Lastnosti metalov v dotiku določimo z deformacijskim kriterijem, ki ga imenujemo Indeks plastičnosti ψ (slika 7). Če deluje v dotiku poleg normalne še tangencialna sila, potem je dotikalna površina večja (slika 7).



Slika 7. Karakteristike tribološkega kontakta.

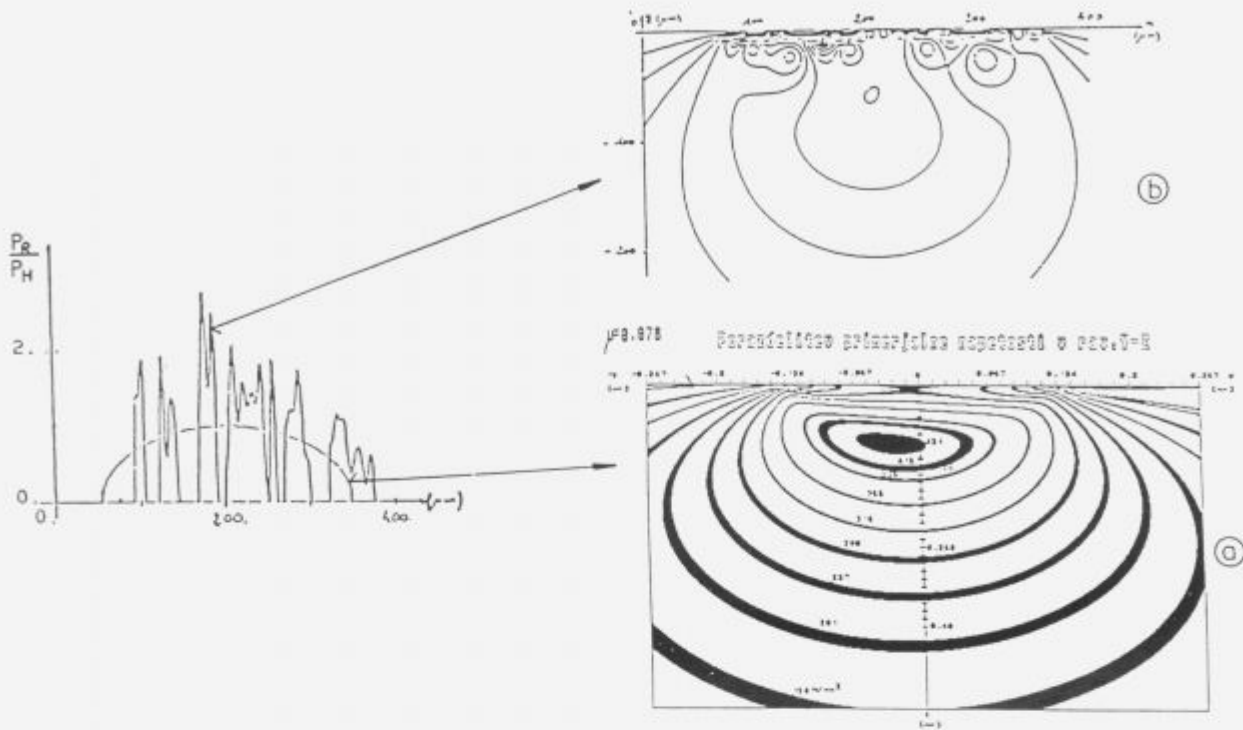
Hertzova teorija upošteva, da se dve telesi, katerih površina je popolnoma gladka, samo elastično deformirata. Tlak, ki nastane na dotikalni površini, ima polkrožno obliko. Napetosti, ki se generirajo na in pod dotikalno površino so enakomerno razdeljene, kot prikazuje slika 8a. Na realni dotikalni površini pa se Hertzov tlak generira na vsaki površini deformiranega vršička, zato je tudi porazdelitev napetosti na in pod dotikalno površino drugačna (slika 8b). Povsem druga slika porazdelitve tlaka pa nastane pri EHD mazanju (slika 2). Tako porazdeljene napetosti je potrebno upoštevati pri reševanju triboloških kontaktnih problemov.

3 Tribološki procesi

3.1 Proces trenja

Adhezijsko komponento trenja sta opisala Bowden in Tabor z močno poenostavljenim modelom, ki upošteva razmerje med strižno napetostjo, ki je potrebna za to da se dotik prestriže in tlakom, ki je potreben, da se vršiček plastično deformira. Za veliko materialov je ta koeficient 0,2, kar ustreza dejanskemu koeficientu trenja pri adheziji. Za povečano dotikalno površino, ki nastane zaradi delovanja tangencialne sile, je mogoče pričakovati, da se bo adhezijska komponenta trenja povečala pri čistih metalih od 10 do 100 krat. Če pa sta dotikalni površini ločeni s filmom (oksid...), ki ima za polovico manjšo potrebno strižno napetost od osnovnega materiala, potem tudi koeficient trenja pade na polovično vrednost. Poleg te poenostavljene teorije poznamo še teorijo površinskih napetosti in teorijo, ki izhaja iz mehanike loma.

Če je pri drsnem tribološkem kontaktu ena dotikalna površina dovolj trša od druge, se bo trši vršiček zadržal v mehkejši površini. Pri tangencialnem premiku bo nastal



Slika 8. Hertzov tlak in porazdelitev Misesovih napetosti.

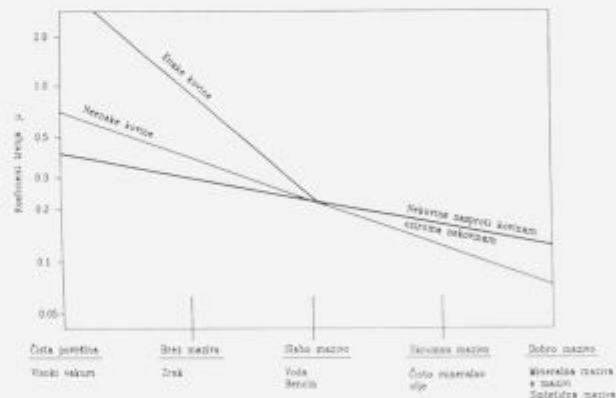
odpor, ki ga imenujemo odpor pri razenju. Model za določitev odpora pri razenju je prvi postavil L. Gumbel leta 1925. Poznamo dva načina razenja in to razenje vršička in razenje z vtisnjenim obrabnim delcem. Poenostavljen model upošteva samo kot, ki ga oklepa vršiček z dotikalno površino, Ghar pa je predložil model, ki upošteva teorijo lomne mehanike s tem, da imajo glavni vpliv lastnosti materiala, ki ga razimo. V primeru, da razi po površini obrabni delec, je zelo pomembno kakšen je premer delca in kako globoko se delec vtisne v površino.

Za deformacije, ki se pojavljajo pri drsnem trenju, predvidevamo, da se mehanska energija izgubi v procesu plastične deformacije. Za to komponento trenja prav tako poznamo več modelov. Več avtorjev je predlagalo deformacijski model drsne linije. Predstavljeni model ima to slabost, da ne upošteva mikrostrukture materiala, utrjevanja med procesom, temperature in plasti, ki se med procesom tvorijo na dotikalni površini. Drugi model, ki sta predlagala Heilman in Rignly, sloni na predpostavki, da je delo trenja enako delu plastične deformacije skozi celotni čas trajanja procesa. V tem modelu so karakteristični trije parametri: realna dotikalna površina, maksimalna strižna napetost materiala, ki jo dosežemo med procesom striga in povprečna strižna napetost, ki jo dejansko dosežemo med procesom drsenja. Vrednost te strižne napetosti je odvisna od delovnih pogojev (sila, drsna hitrost, temperatura) in od karakteristik materiala (mikrostrukture, koeficienta utrjevanja).

Slika 9 nam prikazuje odvisnost koeficienta trenja od načina mazanja za različne kombinacije materialov. Na trenje vpliva tudi vrsta tribološkega kontakta, (slika 10) in hrapavost površine, (slika 11).

3.2 Proces obrabe

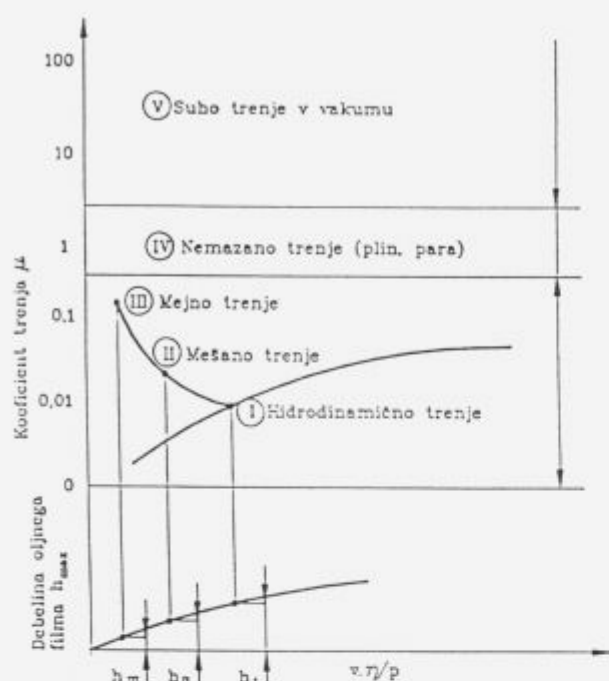
Podobno kot trenje je tudi obraba materiala zapleten proces, v katerem sodelujejo različni mehanizmi in vplivni



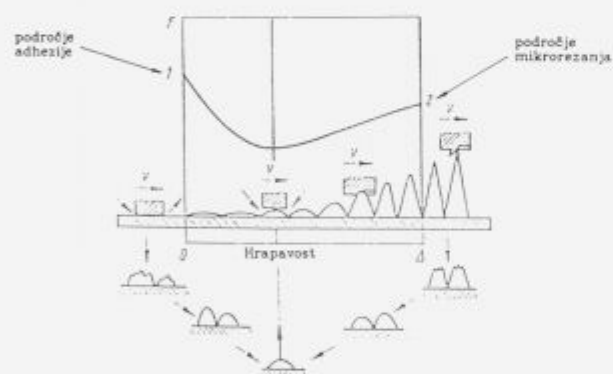
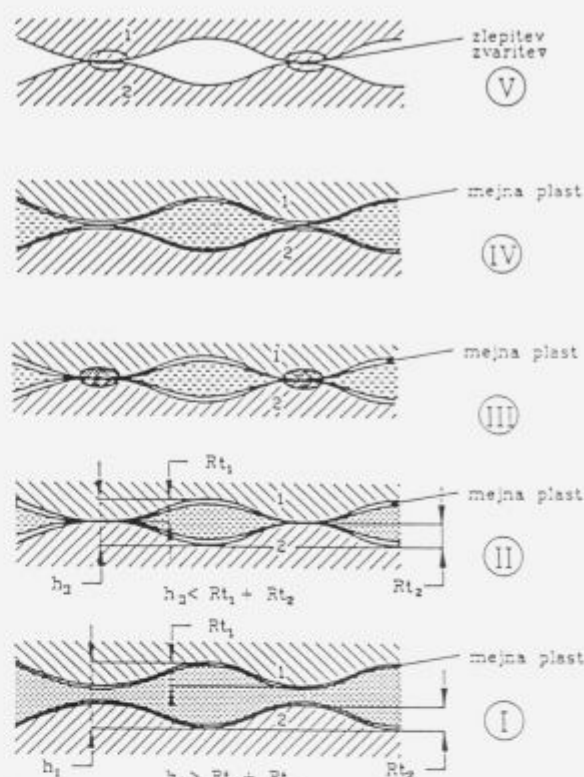
Slika 9. Koeficient trenja kot funkcija maziva pri različnih parih materialov.

parametri. Burwell je definirala štiri vrste obrabnih mehanizmov: abrazija, adhezija, utrujanje površine in tribokemični proces. Veliko avtorjev se je ukvarjalo s študijem obrabe, ki bi jo lahko definirali kot "odstranjevanje materiala z medsebojno delujočih dotikalnih površin pri relativnem gibanju". Nam P. Suh je ugotovil, da obraba nastane pri veliko različnih mehanizmi odvisno od materiala, okolice, delovnih pogojev in geometrije teles v dotiku. Tako razlago mehanizma obrabe lahko delimo v dve skupini: v skupino, kjer prevladujejo mehanske lastnosti trdnih teles v dotiku in v skupino, kjer so prevladujoče kemijske lastnosti materialov. Medsebojne vplive dotikalnih površin in iz tega nastale obrabne mehanizme prikazuje slika 12.

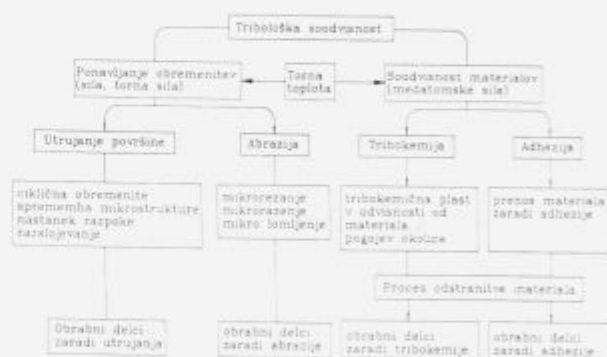
Struktura osnovnega materiala se spremeni, če je material obremenjen s ponavljajočo se obremenitvijo. Sprememba mikrostrukture lahko povzroči večjo mehansko



Slika 10. Koeficient trenja v odvisnosti od vrste dotika v tribološkem kontaktu.



Slika 11. Sprememba koeficienta trenja in mehanizem nastanka upor pri drsnem gibanju.



Slika 12. Tribološka sosedstvenost in obrabni mehanizem.

poškodbo strojnega elementa. Ponavljajoča obremenitev lahko generira na dotikalni površini tudi obrabne delce. Oba procesa, ki ju imenujemo tudi utrujenostna obraba, sta odvisna od velikosti in delovanja napetosti na in pod dotikalno površino ter sta neodvisna od vrste filna, ki se ustvari med dotikalnima površinama. Utrujenostna obraba se pojavi pri kotalnem trenju pa tudi pri ponavljajočem drsnem trenju. Za proučevanje nastanka in širjenje poškodbe uporabljamo teorijo dislokacij. Halling je skladno s teorijo predstavil mehanizem utrujenostne obrabe. Pri drsnem trenju pa uporabljamo za določitev utrujenostne obrabe teorijo razslojevanja.

Mehanizem abrazivne obrabe je podoben kot smo ga opisali pri trenju. Trši vršički odstranjujejo material z dotikalne površine mehkejšega materiala kombinirano na

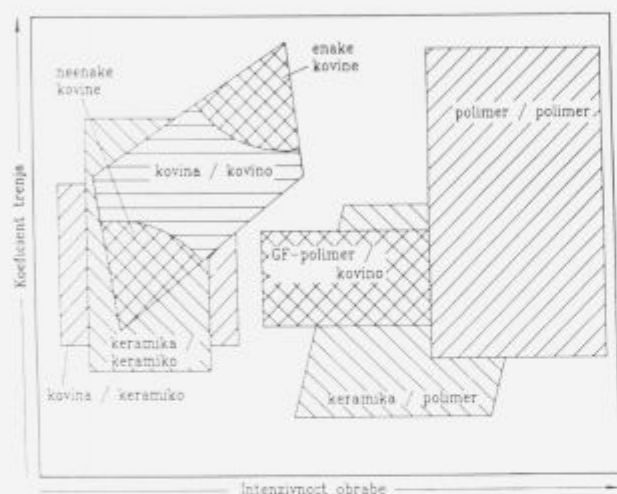
tri načine: z micro-razenjem, micro-rezanjem in micro-lomljenjem. Osnovni poenostavljeni model vključuje od lastnosti materialov samo trdoto. Hornbogen pa je predlagal model, s katerim je mogoče popisati intenzivnost obrabe v odvisnosti od žilavosti materiala. Ta model je osnovan na primerjavi med deformacijo, ki jo ima vršiček med procesom in kritično deformacijo, ki je inicialna za nastanek razpoke. Gahr je upošteval vse tri načine, ki so pomembni za nastanek abrazivne obrabe in predlagal model, ki velja za duktilne materiale in upošteva mikrostrukturne lastnosti materiala na dotikalni površini in trdoto.

Tribokemični obrabni proces je določen z okolico in dinamičnim delovanjem površin v dotiku. Ta proces nastopa tudi pri vseh drugih procesih obrabe. Sam proces nastane v dveh stopnjah: v prvi stopnji pride površina materiala v dotik z okolico. V tem procesu se tvori reakcijski produkt na površini, v drugi stopnji se reakcijski produkt okruši (razpoka, abrazija). Na okrušenem mestu se nato tvori

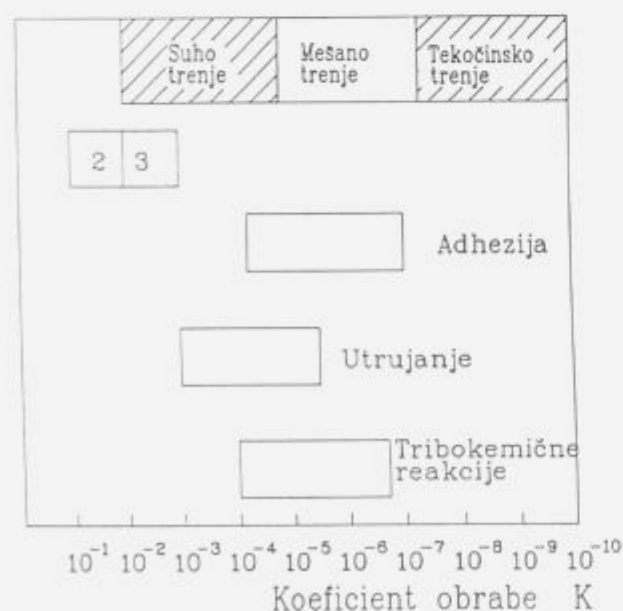
novi reakcijski produkti-proces je torej kontinuiren. Reakcijski produkti se povečujejo z naraščanjem temperature na vršičkih hrapavosti. Mehanske lastnosti oksidacijskega filma na vršičkih so različne, zato so te plasti podvržene krhkim lomom.

Proces adhezivne obrabe je popisal Archard. Njegova enačba upošteva samo trdoto dotikalne površine materiala. Različne lastnosti materiala v dotiku so upoštevane s posebnim koeficientom, ki ga je potrebno določiti za vsak material posebej.

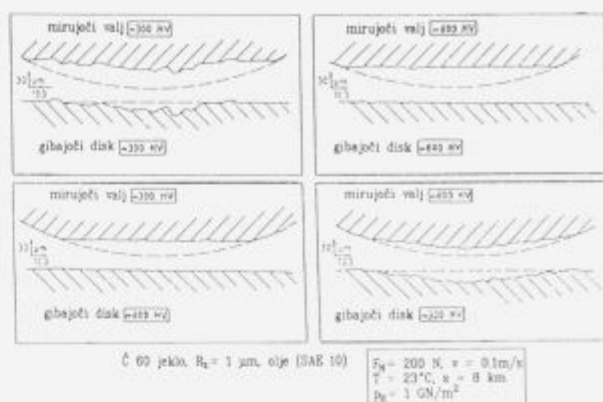
Na sliki 13 je prikazana odvisnost koeficienta trenja od intenzivnosti obrabe za kombinacije več različnih materialov. Koeficient obrabe je odvisen od mehanizma obrabe in vrste trenja (slika 14). Vpliv trdote na obrabo nam prikazuje slika 15.



Slika 13. Odvisnost koeficienta trenja in obrabe za različne pare materialov.



Slika 14. Koeficient obrabe.



Slika 15. Stanje obrabljene površine pri različnih kombinacijah trdote.

4 Razvoj tribologije v prihodnosti

Iz prikazanega je mogoče razbrati, da se je tribologija razvijala vse do leta 1950 kot stranska veja mehanike oziroma njenega dela trdnosti. Po letu 1950 oziroma 1966, je tribologija zelo hitro pridobivala na veljavi. Danes je v svetu priznana kot samostojna znanstvena in tehnološka disciplina. Raziskovalno delo na področju tribologije je doživelo zdrav razvoj šele po letu 1970. Letno je publiciranih preko 6000 člankov v dostopni literaturi. Vse svetovne znanstvene agencije kot tudi vladni programi namenijo raziskavam na področju tribologije znatna sredstva. Število univerz, ki uvrščajo tribološke raziskave v svoje programe, se nenehno povečuje. Veliko tovarn je sprejelo tribologijo kot pomembno področje pri raziskavah in razvoju novih izdelkov.

Tako kot na drugih področjih, je tudi na področju tribologije veliko raziskovalnih dosežkov dobilo ustrezno potrditev v praksi. Naštajmo samo nekatere:

1. razvoj hidrodinamičnega mazanja za stroje v hidroelektrarnah in vlečne agregate za železniški transport,
2. razvoj aditivov za potrebe motorjev z notranjim izgorovanjem,
3. razvoj sintetičnih olj za potrebe turbinskih motorjev,
4. razvoj specialnih trdih maziv za posebne namene in polete v vesolje,
5. razvoj trdih prevlek za izboljšanje življenjske dobe orodij za obdelovalne stroje.

Leta 1986 je National Science Foundation organiziral posebno konferenco z namenom, da začrta razvoj tribologije v prihodnosti. Konferenca je predlagala naslednja področja delovanja:

- vrste trenja
- tribološke plasti
- mehanizmi in procesi obrabe
- kemija maziv
- modeliranje triboloških procesov
- modeliranje tribološkega sistema
- tribološki materiali
- diagnostika
- testiranje

V Sloveniji so pred drugo svetovno vojno in po njej delovale posebne "tehnične službe", ki so imele nalogo pomagati vzdrževalcem in konstrukterjem pri izbiri maziv. Omenjene službe so delovale v okviru tujih petrolejskih podjetij kot so Schell, Mobil, itd. Po ustanovitvi slovenskega podjetja Petrol so se vse tehnične službe, ki so delovale na slovenskem ozemlju združile v eno, ki še danes deluje pod okriljem Petrola. Prof. Struna in kasneje prof. Hlebanja sta vpeljala v pedagoški proces izbirni predmet Mazanje oziroma kasneje Tribologija. Danes se tribologija predava v 4. letniku rednega študija—konstrukcijska smer na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani in Tehnični fakulteti v Mariboru. V okviru študija tribologije je mogoče opraviti vse stopnje študija od višje do visoke šole in podiplomskega študija. Raziskovalno delo na področju tribologije poteka v okviru laboratorija za tribologijo na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani. Vsebinsko raziskovalnega dela poskušamo kar se da povezati z novimi smerni razvoja tribologije v svetu in predvsem s potrebami naše domače industrije.

5 Literatura

- ¹ W.J. Bartz: Zur Geschichte der Tribologie, Expert Verlage, Band 1, 1988
- ² W.J. Bartz: Energieeinsparung durch tribologische Maßnahmen, Expert Verlag, Band 2, 1988
- ³ H. Czichos: Importance of Properties of Solids to Friction and Wear Behaviour, Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), 1988
- ⁴ S. Jahanmir: Future Directions in Tribology Research, Journal of Tribology, Vol. 109, 1987
- ⁵ J. Vižintin: Program razvoja "TRIBOLOGIJA", Ljubljana, 1975
- ⁶ J. Vižintin: Laboratorij za tribologijo, Strojniški vestnik, Ljubljana 33, 1987, 7–9